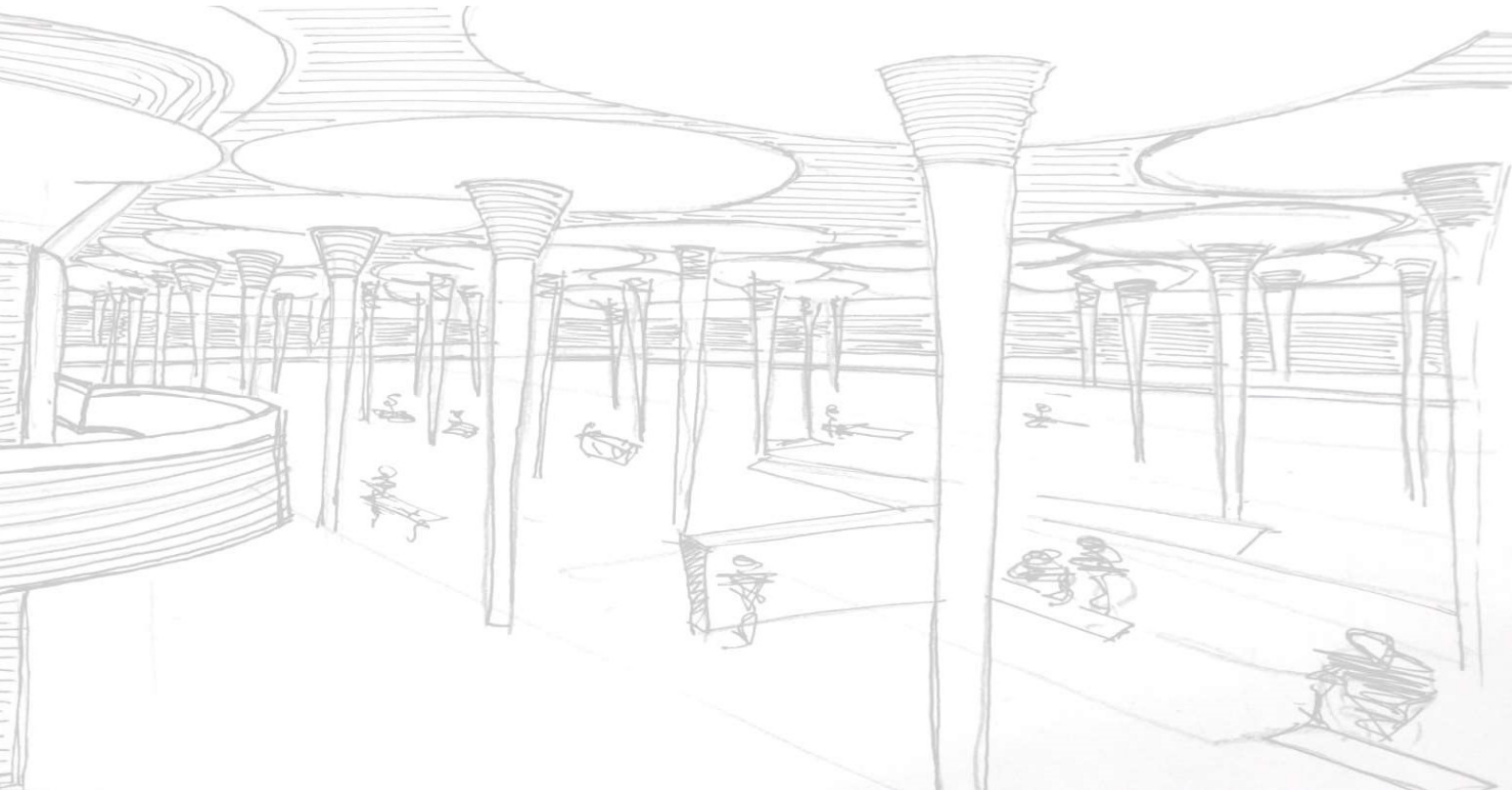


**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA



ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS DE LOS GRANDES ARQUITECTOS

**EDIFICIO JOHNSON WAX**  
**FRANK LLOYD WRIGHT**

Autor: RUBÉN ARRANZ MORENO  
Tutor: GAMALIEL LÓPEZ RODRIGUEZ

CONVOCATORIA JULIO 2016



RESUMEN.....	5
SUMMARY .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
1. OBJETIVOS.....	15
<b>II. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>18</b>
1. LA EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS .....	18
1.1. Introducción histórica .....	18
1.2. En la antigüedad .....	19
1.3. En la Edad Media.....	21
1.4. En los siglos XV-XVIII.....	22
1.5. En los siglos XIX-XX .....	24
1.6. Siglo XXI .....	29
2. LA EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXPRESIÓN GRÁFICA DE LAS ESTRUCTURAS.....	30
2.1. Introducción.....	30
2.2. Los orígenes.....	30
2.3. La Edad Media .....	31
2.4. El Renacimiento.....	31
2.5. Siglos XVII - XIX.....	32
2.6. Siglo XX .....	32
3. CRÍTICA DE LAS ESTRUCTURAS .....	38
3.1. Introducción.....	38
3.2. La materialidad y la destrucción de la caja. ....	38
3.3. Estructura y composición como aditivo o unidad .....	39
3.4. Objeto vs Espacio .....	40
3.5. Consideración de la estructura (Diagramas).....	41
3.6. La cuadrícula cartesiana .....	43
3.7. Vacío como creador. ....	43
<b>III. EDIFICIO JOHNSON WAX, FRANK LLOYD WRIGHT.....</b>	<b>46</b>
1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	46
2. DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA .....	48
2.1. Introducción.....	48
2.2. Antecedentes.....	49
2.3. Edificio de administración de la Johnson Wax .....	52
2.4. Elementos característicos, las columnas y la rotura de las esquinas. ....	54
3. ANÁLISIS .....	61
3.1. Introducción.....	61
3.2. Análisis compositivo .....	61
3.3. Análisis estructural: .....	69
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>96</b>
CONCLUSIONES:.....	96
<b>V. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>98</b>
1. BIBLIOGRAFÍA: .....	98



**RESUMEN**

El presente trabajo de investigación se centra en analizar la tipología estructural de la sala de trabajo del edificio "Johnson Wax", una obra muy representativa para la evolución y el cambio conceptual de la arquitectura diseñada por el arquitecto estadounidense Frank Lloyd Wright entre los años 1936 y 1939, con el objetivo principal de determinar el grado de importancia que tiene la solución adoptada en la percepción del espacio arquitectónico.

La estancia más reconocida del primer proyecto de Wright para la Johnson Wax es la gran sala de trabajo, donde se distribuyen diáfananamente los diferentes puestos de trabajo de sus empleados en un bosque interior de 60 columnas representativas de la arquitectura orgánica de Wright.

Se ha realizado una introducción al ámbito que nos ocupa repasando la evolución histórica de los métodos de cálculo de las estructuras, la influencia que tenían estas en la concepción de la arquitectura y la que van adquiriendo hoy en día y los avances en la representación gráfica de las mismas. Así mismo, se han dado una serie de bases en cuanto a la crítica de las estructuras realizadas por diferentes autores, adquiriendo de esta forma conocimientos que nos permitan enfocar el análisis de una estructura y sus repercusiones.

Posteriormente, se ha descrito con la mayor exactitud que nos puede permitir el desarrollo de este trabajo la evolución de la construcción del proyecto en cuestión, desde una breve introducción histórica necesaria para comprender los detalles del proyecto hasta una descripción técnica y más específicos de los elementos constructivos y estructurales característicos de la obra.

Una vez organizados todos los aspectos anteriores, se ha llevado a cabo la crítica de la estructura adoptada por el propio Wright, proponiendo una serie de soluciones estructurales alternativas para analizar en qué grado afectan a la concepción y percepción del espacio arquitectónico.

La recopilación de los datos de los diferentes supuestos tratados han permitido confirmar que la solución y la tipología original adoptada por Frank Lloyd Wright es, además de muy eficaz estructuralmente y pionera en la época, la más coherente posible con sus principios proyectuales.

Gracias a este trabajo, se ha podido valorar la verdadera importancia que tiene la estructura en la concepción de la arquitectura y no como mero residuo de ésta, permitiendo de este modo comprobar el impacto compositivo y visual que la estructura tiene en la concepción de proyectos arquitectónicos.

**SUMMARY**

The following research work focus on the structural type analysis of the Johnson Wax's great workroom, one very remarkable work in the evolution and the conceptual change of the architecture designed by the American architect Frank Lloyd Wright between 1936 and 1939, with the main aim of determine the importance of the adopted solution in the way of perceiving the architecture.

The Johnson Wax's most representative element is the great workroom, where the working places are distributed along the wide space, in a 60 columns forest representative of Wright's architecture.

It has been made an introduction to the theme by an historical evolution of the calculation methods, how structure affected in the architecture and how it is now a days and the evolution of the way to represent them. Further, it has been given some bases of how to analyze and criticize the structures by some different authors, gaining this way knowledge which let us to know where to look to analyze an structure and its impact.

Lately, it has been described as good as the size this works let us the constructive process of the project, from an historical introduction needed to understand the details to a more technical description of the principal constructive points and structural elements in the work.

Once those detail has been organized, it has been criticized the Wright's adopted type of structure , making several proposals to analyze which modified the original condition of both cases, the structure and the conceptual project idea. Analyzing the results and seeing its different answers.

The compilation of the information about the proposals given, has let us confirmed the Wright's solution and type of structure to be, as well as structurally effective and pioneering in that time, the most coherent with his principles.

Thank to this work, it has been able to realize the true importance of the structure as architecture maker and not as residual part of this. Letting us this way see the compositional impact of the structure in the design of projects.



**ÍNDICE DE FIGURAS**

- Fig 1: Santa Sofía, Antemio de Tralles e Isidoro de Mileto, Estambul. Disponible en <http://letra15.es/L15-04/L15-04-31-Vasos-Jorge-Mateos-Enrich-Tres.edificios.literarios.html>.
- Fig 2: Puente de ferrocarril sobre río Ebro.
- Fig 3: Pirámide escalonada de Saqqara, Imhotep (aproximadamente 2650 a.C.). Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%A1mide\\_escalonada\\_de\\_Zoser](https://es.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%A1mide_escalonada_de_Zoser).
- Fig 4: Marco Vitruvio De Architectura (aproximadamente entre los años 23-30 a.C.) Disponible en <http://www.artifexbalear.org/vitruvio.htm>.
- Fig 5: Espiral aurea de Fibonacci. Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/Espiral\\_dorada](https://es.wikipedia.org/wiki/Espiral_dorada).
- Fig 6: Cercha propuesta por Andrea Palladio sobre el río Cismone en "Los cuatro libros de la arquitectura".
- Fig 7: Viga en ménsula de Galileo. Disponible en Jacques Heyman, Análisis de estructuras, Un estudio histórico.
- Fig 8: Invención de la máquina de vapor (Watt, 1785). Disponible en [http://blogsdeandreamir.blogspot.com.es/2013\\_02\\_01\\_archive.html](http://blogsdeandreamir.blogspot.com.es/2013_02_01_archive.html).
- Fig 9: Entramados triangulados utilizados por Charlton para explicar la teoría de Maxwell. Disponible en Jacques Heyman, Análisis de estructuras, Un estudio histórico.
- Fig 10: Primera etapa proceso de Método de Cross. Disponible en Jacques Heyman, Análisis de estructuras, Un estudio histórico.
- Fig 11: Ecuación general del Método Matricial. Disponible en Jacques Heyman, Análisis de estructuras, Un estudio histórico.
- Fig 12: Esquema de una cámara oscura del S XVIII. Disponible en [https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara\\_oscura](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_oscura).
- Fig 13: Walking City, Archigram. Disponible en <http://www.arqhys.com/contenidos/grupo-arquitectonico-archigram.html>.
- Fig 14: Superficie de Béizer, creada a partir de su curva. Disponible en <http://dcain.etsin.upm.es/~leonardo/tema5.htm>.
- Fig 15: Dibujos de la idea para el Guggenheim de Bilbao, Frank O. Gehry.
- Fig 16: University of Leicester, James Stirling. Disponible en <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=505812>.
- Fig 17: Esquemas de desmaterialización de los elementos. Elaboración propia.
- Fig 18: Esquemas ejemplo de adicción y de unidad. Elaboración propia.
- Fig 19: Esquemas sobre el concepto de objeto y de espacio. Elaboración propia.



- Fig 20: Le Corbusier, casa Dom-Inó, 1914. Disponible en <https://apc2008.wordpress.com/2008/04/16/estructura-simple-ideada-por-le-corbusier-a-traves-del-uso-del-hormigon-armado/> .
- Fig 21: Crown Hall, IIT, Chicago, 1950-56. Disponible en <http://www.arquine.com/ejemplos-ejemplares-crown-hall/> .
- Fig 22: Esquema de diagramas de paraguas y Dom-Inó. Elaboración propia.
- Fig 23: Esquemas de diagramas icónico y simbólico. Elaboración propia.
- Fig 24: Esquemas de vacío como creado o creador. Elaboración propia.
- Fig 25: Frank Lloyd Wright, Casa Kaufmann (1937). Disponible en <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-54599/clasicos-de-arquitectura-la-casa-en-la-cascada-frank-lloyd-wright> .
- Fig 26: Broadacre city, Frank Lloyd Wright, 1934. Disponible en <http://arquiscopio.com/archivo/2013/08/10/broadacre-city/> .
- Fig 27: Boceto conceptual realizado por F.L.Wright de la sala de trabajo del edificio Johnson Wax. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 28: Planta Larkin Building, 1908. Disponible en <http://jhenniferamundson.net/arc-331/arc-331-images/search-for-american/> .
- Fig 29: Alzado este y sección del proyecto para le Capital Journal. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 30: Esquema compositivo y recorrido sobre planta del proyecto del Capital Journal. Elaboración propia y planta disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 31: Esquema compositivo y recorridos sobre planta edificio Larkin. Elaboración propia y planta disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 32: Esquema conjunto sobre planta del edificio Johnson Wax. Elaboración propia y planta disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 33: Sección esquemática distribución y espacios. Elaboración propia
- Fig 34: Planta de acceso y planta intermedia sobre sala de trabajo. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 35: Planta tercera del edificio Johnson Wax. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 36: Axonométrica tipo muro cerramiento perimetral. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 37: Imagen de la realización de la prueba de carga. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 38: Planta y sección de una columna cortada para ver la formación del Petal. Elaboración propia.
- Fig 39: Esquema comparativo entre columna y mano de un camarero. Elaboración propia.

- Fig 40: Esquema de los tres tipos de columnas superpuestas. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 41: Imagen interior del detalle final de la claraboya con la introducción de la luz artificial. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 42: Esquina de vidrio con muro no portante. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 43: Esquemas de materialidad tradicional de muros de ladrillo frente a la utilizada en el proyecto de Wright. Elaboración propia.
- Fig 44: Esquema de esquina tradicional y esquina con hueco. Elaboración propia.
- Fig 45: Esquema de rotura de la caja de ladrillo. Elaboración propia.
- Fig 46: Esquema formación del proyecto mediante la unidad de columnas. Elaboración propia.
- Fig 47: Esquema adhesión de los diferentes volúmenes. Elaboración propia.
- Fig 48: Foto maqueta. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 49: Alzado proyecto finalizado. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 50: Esquema en sección de como el espacio interior y exterior se convierte en uno solo. Elaboración propia.
- Fig 51: Esquema entre vacíos. Elaboración propia.
- Fig 52: Retícula de columnas utilizada para la creación de la sala de trabajo. Elaboración propia.
- Fig 53: Comparación con diagrama Dom-Inó. Elaboración propia.
- Fig 54: Planta acceso a la gran sala de trabajo. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 55: Planta de planta intermedia sobre sala de trabajo. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 56: Planta superior. Disponible en JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.
- Fig 57: Planta esquema Escala: 1/300. Elaboración propia.
- Fig 58: Sección longitudinal sala de trabajo, 6 columnas. Elaboración propia.
- Fig 59: Sección transversal sala de trabajo, 10 columnas. Elaboración propia.
- Fig 60: Esquemas de las soluciones realizadas por Wright en cuanto al forjado de la planta intermedia. Elaboración propia.
- Fig 61: Imagen del funcionamiento de la viga Gerber o Cantilever. Disponible en <http://puentes.galeon.com/tipos/pontscantilever.htm> .

- Fig 62: Esquema cantilever en la estructura de Wright. Elaboración propia.
- Fig 63: Esquema de la influencia de la estructura en la entrada de luz. Elaboración propia.
- Fig 64: Dibujo esquema de influencia de la estructura en la concepción del espacio y la arquitectura. Elaboración propia.
- Fig 65: Esquema de fluidez del espacio dependiendo de la sección del pilar. Elaboración propia.
- Fig 66: Esquema de posición de la cercha. Elaboración propia.
- Fig 67: Esquema entrada de luz y espacio en el edificio de Mies van der Rohe. Elaboración propia.
- Fig 68: Propuesta de planta con cerchas separadas 13,5 metros bi-apoyadas en pilares empotrados. Elaboración propia.
- Fig 69: Propuesta de sección con cercha separada 13,5 metros bi-apoyada en pilares empotrados. Elaboración propia
- Fig 70 : Esquema de cargas sobre jácena bi-apoyada. Elaboración propia.
- Fig 71: Dibujo esquema percepción sala de trabajo con la tipología propuesta. Elaboración propia.
- Fig 72: Propuesta con viga pasante y apoyos múltiples según distribución original. Elaboración propia.
- Fig 73: Esquema de cargas y momentos sobre viga con luces de 7m. Elaboración propia.
- Fig 74: Esquema áreas tributarias de 7x7m. Elaboración propia.
- Fig 75: Dibujo esquema percepción sala de trabajo con la tipología propuesta. Elaboración propia.
- Fig 76: Propuesta con ampliación de las luces a 9 metros. Elaboración propia.
- Fig 77: Esquema de carga distribuida y fletores en viga con luces de 9m. Elaboración propia.
- Fig 78: Esquema de áreas tributarias de 7x9 m. Elaboración propia.
- Fig 79: Dibujo esquema de percepción de la sala de trabajo con la tipología propuesta. Elaboración propia.
- Fig 80: Esquema de caja con la inclusión de muros de carga. Elaboración propia.
- Fig 81: Propuesta con muros de carga y luces originales de 7 metros. Elaboración propia.
- Fig 82: Carga distribuida sobre propuesta de muro de carga y apoyos intermedios. Elaboración propia.
- Fig 83: Dibujo esquema percepción sala de trabajo con tipología propuesta. Elaboración propia.
- Fig 84: Esquema aperturas orgánicas SANAA. Elaboración propia.
- Fig 85: Propuesta con losa como cubierta y aperturas orgánicas. Elaboración propia.

Fig 86: Esquema cargas distribuidas con momentos puntuales actuantes en cabeza de pilar. Elaboración propia.

Fig 87: Esquema pilar con momento actuante en cabeza. Elaboración propia.

Fig 88: Esquema áreas tributarias de 10,5 x 7 m. Elaboración propia.

Fig 89: Dibujo esquema percepción sala de trabajo con tipología propuesta. Elaboración propia.



## I. INTRODUCCIÓN

Primeramente, nos hemos sumergido en el campo histórico, señalando y estudiando los pasos que creemos más significativos en la evolución del cálculo y representación de las estructuras, así como tangencialmente de la arquitectura.

Desde el primer arquitecto conocido, Imhotep; pasando por Marco Vitrubio y su tratado "[DE ARQUITECTURA](#)"; Leonardo de Pisa (Fibonacci) o Galileo y sus ensayos, pasando por la segunda parte del siglo XX y llegando hasta nuestros días, hemos ido recogiendo los avances más importantes, prestando especial atención a este periodo ya que es cuando se ha producido la mayor revolución tecnológica que ha permitido la creación de edificios que, hasta entonces, parecía imposible que se convirtieran en realidad.

Un aspecto a tener en cuenta para el desarrollo del presente trabajo es la relación existente entre arquitectura y estructura, o como muchos autores ya han tratado, entre arquitecto (arquitectura) e ingeniero (estructura). De hecho, a lo largo de la historia de la arquitectura, modelos creados por la imaginación de arquitectos(arquitectura) han estado fuera del alcance de las posibilidades técnicas de la época(estructura) en numerosas ocasiones debido a la relación inseparable del uno con el otro para materializar un ejemplo real.

Estas limitaciones han ido menguando con el paso de los años hasta el punto de prácticamente desaparecer hoy en día, donde casi cualquier planteamiento puede ser representado y analizado gráfica y estructuralmente gracias a los numerosos software de modelado existentes en el mercado. En los últimos años la evolución del cálculo de estructuras ha estado claramente marcada por la aparición del "Método de los Elementos Finitos" en la década de los 50; las curvas de Bézier en los 60 y, por último, por la aparición de los ordenadores y el software informático en los 90 ([REY 2013](#)).

Los programas de CAD (Computer-Aided Design), que permiten parametrizar y reglar elementos aparentemente amorfos, así como los programas de cálculo de estructuras, sobre todo los basados en el Método de los Elementos Finitos, son los que han facilitado la posibilidad de materializar casi cualquier modelo imaginado. Este hecho ha creado una revolución a nivel formal en lo relacionado con el mundo de la arquitectura

---

*"Pirámides, catedrales y cohetes existen no por causa de la geometría, la teoría de estructuras o la termodinámica, sino porque antes fueron imágenes, literalmente visiones, en la mente de quienes los concibieron" Ferguson 1994*

---

Así, como ejemplo de lo anterior, se puede citar al arquitecto Peter Eisenman (Newark, New Jersey, 1932), con un perfil investigador y teórico, que ha concebido y diseñado obras en la década de los sesenta y setenta que no se han podido llevar a cabo hasta fechas recientes. El Aronoff Center for Design and Art (1988-96) fue su primer proyecto dibujado con la ayuda de ordenadores (CAD).

Aunque los ordenadores y el software posibilitaba el cálculo de casi cualquier forma imaginada, los procedimientos constructivos e industriales en el apartado de la construcción de estructuras no evolucionaron paralelamente. Por ejemplo, durante mucho tiempo los rascacielos y los ascensores estuvieron ligados en su evolución ya que existía la tecnología para hacer los edificios más altos pero no para que los ascensores alcanzaran la altura que éstos demandaban.

Cabe citar que los medios digitales, junto con la potencia de cálculo, han ayudado en la investigación de nuevas ideas en lo relacionado con la seguridad, acciones y control de las estructuras (REY 2013).

El ámbito de la representación arquitectónica ha evolucionado bastante paralelamente a lo citado en cuanto al cálculo de estructuras, teniendo su máximo apogeo de igual manera a finales del siglo XX y, sobre todo, desde comienzos del siglo XXI hasta nuestros días, donde casi a diario surgen nuevas formas de representar la arquitectura que ayudan a que la profesión pueda llevarse a cabo cada vez de una manera más eficiente.

Separándonos un poco de lo estrictamente evolutivo en cuanto a la estructura, hay que decir que desde el principio de la arquitectura ha habido teóricos y no teóricos que han analizado la función de la estructura en los edificios. En la antigüedad, los constructores creaban sus obras a partir del estudio de aquellas que habían perdurado, un análisis práctico que puede tratarse como un precedente a los Peter Eisenman o los Kenneth Frampton modernos que abordan, con mayor profundidad y delicadeza, el estudio de la estructura y la composición de los edificios.

Desde esta perspectiva se va a analizar el Johnson Wax Building, un edificio moderno para su época concebido por el arquitecto americano Frank Lloyd Wright, en el que se explican muchos de los principios que regían su forma de entender la arquitectura de una manera magistral. Destaca sobre el resto su idea de conexión de las obras con la naturaleza, lo que se llamó arquitectura orgánica, de líneas cuidadas, delicadas y horizontales, y luz, pero percibiéndola de una manera similar a cómo sería en la naturaleza.

*"The light seemed to be the matter of which the great room was made" Jonathan Lipman*

---

## 1. **OBJETIVOS**

El presente Trabajo Fin de Grado aborda la importancia que tiene la estructura en la concepción y composición de la arquitectura, analizando la evolución de las tipologías estructurales a lo largo de los años hasta cómo la concebimos en nuestros días, donde ya no tiene una función secundaria en la resolución compositiva de proyectos, sino que en muchos casos se convierte en un motivo proyectual.

El objetivo principal es analizar la solución estructural adoptada por uno de los grandes arquitectos, proponiendo variantes de tipologías estructurales. Datando en qué van afectando al edificio de manera que influyan a las ideas proyectuales, a la percepción de la luz creada o a la composición del espacio. El ejemplo real seleccionado para su crítica y análisis será el edificio del arquitecto norteamericano Frank Lloyd Wright, el edificio de administración de la Johnson Wax, conocido en el mundo de la arquitectura por su sala de trabajo compuesta por 60 "mushrooms columns".

La relación entre proyecto y estructura hace que este trabajo se sumerja como objetivos secundarios en el campo de la crítica de las estructuras a nivel teórico, como ya realizó en su día el propio Peter Eisenman en su libro: "10 edificios canónicos"; en la ordenación de la evolución del cálculo de las estructuras ; y de la misma manera de la representación de éstas.

Resumiendo, a través de la estructura de Wright para el edificio de administración de la Johnson Wax, se realizará un repaso a la evolución de las estructuras, mejorando su comprensión así como llegando a encontrar el por qué de una elección u otra dependiendo de factores determinantes como pueden ser la tipología estructural o las luces entre apoyos.





## II. ESTADO DEL ARTE

### 1. LA EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS

#### 1.1. Introducción histórica

Gran parte de las veces, la evolución de los métodos de cálculo ha ido ligada a la aparición de nuevos materiales de construcción. En la antigüedad, con la cantería y madera como materiales predilectos para la construcción el método más utilizado era el tradicional o el de prueba y error, basado resumidamente en la aplicación de reglas de proporción.

El inicio de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, la aparición del acero como material estructural y posteriormente la del hormigón armado en el siglo XX, trajo consigo la necesidad de métodos de cálculo para solucionar tipos estructurales no habituales hasta entonces, entre los que destacan las estructuras reticulares o la sucesión tridimensional de pórticos hiperestáticos (pilar-viga o pórtico). Esta disposición se había utilizado anteriormente en madera, pero en ésta el diseño se realizaba con uniones articuladas que evitaban la hiperestaticidad.

No se pudo resolver con certeza las complejas ecuaciones hiperestáticas que creaban los nuevos tipos estructurales hasta la aparición en 1930 del Método de Cross y posteriormente, en la segunda mitad del siglo XX, cuando ésta evolución ha sido más notable, con la aparición del Método de los Elementos Finitos y los ordenadores. Estas nuevas herramientas y procedimientos han eliminado finalmente la barrera que suponía el análisis estructural en la concepción de proyectos arquitectónicos.

Esta evolución en los métodos de cálculo también se ha visto reflejada en la manera de construir. En la antigüedad, basados en la experiencia previa y reglas de proporción, los edificios se caracterizaban por una construcción masiva, preocupados principalmente por su estabilidad. (Figura 1)

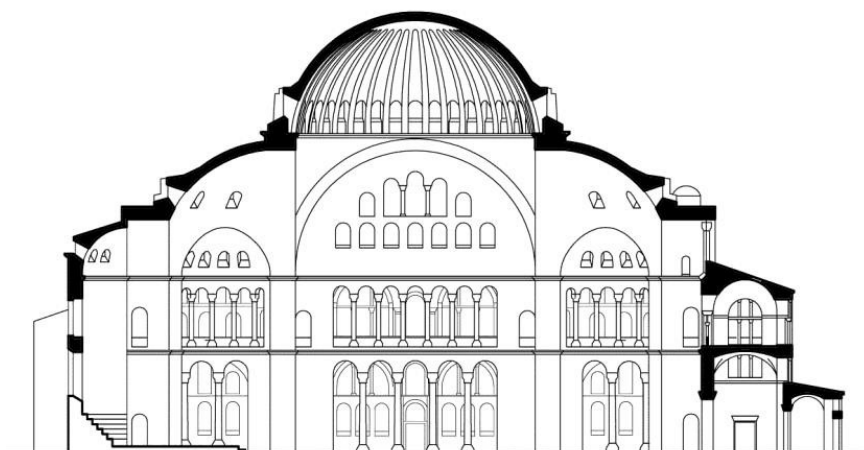


Figura 1. Santa Sofía, Antemio de Tralles e Isidoro de Milleteo, Estambul (SigloV)

Evolucionando posteriormente, gracias como hemos dicho a la aparición tanto de nuevos materiales como de nuevos métodos de cálculo, a una construcción más audaz, es decir, unos edificios más ligeros, esbeltos y diáfanos que los de los primeros años. Preocupándose por conseguir edificios de una construcción más económica, con una mejor utilización de los materiales.



Figura 2. Puente ferrocarril sobre río Ebro

Resumidamente, de lo que en edificación conocemos como estereotómico, que se refiere al apilamiento de partes que cargan y que por medio de la compresión transmiten los esfuerzos al suelo. Se va a evolucionar hacia lo tectónico, comprendiendo tectónico como ensamblaje, como unión de piezas para conseguir un funcionamiento conjunto. (Figura 2)

## 1.2. En la antigüedad

Debido a la falta de escritos prácticos sobre construcción en los primeros años y del secretismo de las logias de constructores, el método que se seguía era el de prueba y error, también conocido como método tradicional. Sí se intuían las cargas y acciones pero no se conocían con certeza sus valores de acción.

Ésta forma de construir se basaba en un análisis de los registros de construcciones pasadas; en la asunción de riesgos, innovando en formas y procesos constructivos; y en la construcción de modelos a escala (REY 2013). Resaltando ésta última idea, se construían maquetas a gran escala, las cuales se utilizaban para dar o no validez a la propuesta. En problemas mayoritariamente de equilibrio y estabilidad si el modelo era estable, también lo sería el edificio real.

Como ya citó el ingeniero Eduardo Torroja, el estudio de estos modelos fue válido y se utilizó durante el Gótico y el Románico ya que en estos estilos los problemas eran, como se ha comentado anteriormente, de equilibrio, actuando cargas contra cargas, por lo cual la escala no tiene relevancia. Se creó así un nuevo método de construcción en el que la teoría estaba sustentada o respaldada por la práctica.

A pesar de que mayoritariamente se seguía el método citado anteriormente, cabe resaltar a los que podemos llamar los impulsores del cálculo o de la influencia técnica basada en "leyes" o "reglas". Entre dichos impulsores mencionaremos brevemente, al primer arquitecto conocido, Imhotep (aproximadamente 2690-2610 a.C.) al que se le atribuye el diseño del complejo funerario de la pirámide escalonada de Saqqara (aproximadamente 2650 a.C.)



Figura 3. Pirámide escalonada de Saqqara, Imhotep (aproximadamente 2650 a.C.)

También debemos mencionar a Aristóteles (Estagira, 384 a.C.- Cilcis 322 a.C.) discípulo de Platón en Atenas. En su "Tratado del Cielo" aparece el concepto de geocentrismo y en su "Tratado de la Física" desarrolla el estudio de conceptos de la mecánica, definición de movimiento, clases y causas que lo provocan.

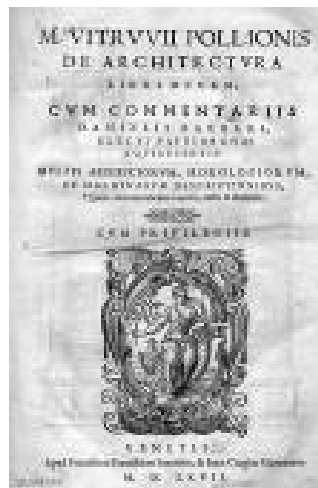


Figura 4. Marco Vitruvio De Architectura (aproximadamente entre los años 23-30 a.C.)

Asimismo no hay que olvidar a Arquímedes de Siracusa (Siracusa 287 a.C. - 212a.C.), considerado el fundador de la Estática, autor del tratado "Sobre los cuerpos flotantes" y el célebre "Tratado de equilibrio de los planos", que recoge la conocida Ley de la Palanca.

*"Todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del volumen del líquido desalojado" Arquímedes de Siracusa*

Por último cabe citar a Marco Vitruvio con su tratado "De Architectura", seguramente el mayor registro escrito de la época con un total de diez libros. En este tratado se recogen muchas reglas de proporción para la construcción como la del módulo relativo al diámetro de la columna. (HEYMAN, 2001). Gracias a éstas "normas" han sobrevivido muchos de los templos de la época.

### 1.3. En la Edad Media

En estas reglas de proporción escritas por Vitrubio, de las que se hicieron copias en Monasterios durante toda la Edad Media, se basan muchos de los principios de la construcción Gótica. Probablemente estas reglas hayan sido uno de los principales motivos que han garantizado la supervivencia de estas construcciones medievales.

Gracias a estas "reglas" de proporción, la fábrica trabajaba aproximadamente a la mitad de su resistencia a compresión por lo que el problema volvía a ser puramente geométrico, siendo el cálculo de tensiones una cuestión secundaria para su correcto funcionamiento.

Por otra parte, durante la Edad Media, sí que es cierto que hubo ciertos avances en el conocimiento matemático, como la publicación por parte de Muhamed Musa Al-Khawarizmi (780-850) de un libro de aritmética que difundió el sistema numérico decimal. Estos conocimientos fueron introducidos en Francia por Gerberto de Aurillac (Papa Silvestre II) en el siglo X.

A partir del siglo XI, en Italia, se fundan las primeras Universidades, que pronto se extienden a lo largo y ancho de Europa.

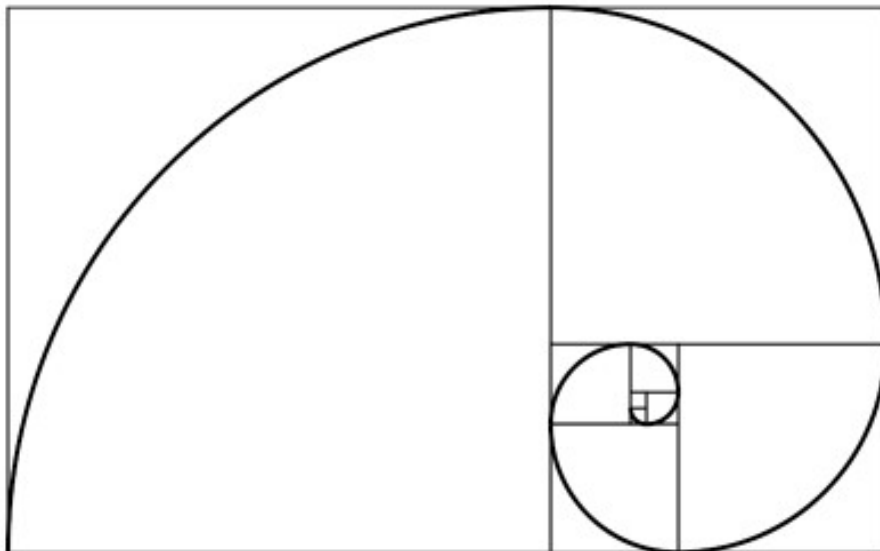


Figura 5. Espiral aurea de Fibonacci

Posteriormente, ya en el siglo XIII, aparece la que es conocida como primera Escuela medieval de Mecánica, fundada por Giordano Nemorario (11xx-1237). Alabada por la primera formulación correcta de "la ley del plano inclinado", además de por ser la primera en utilizar letras para representar números, posibilitando de ésta forma la formulación de teoremas algebraicos generales.

Por último, citamos a Leonardo de Pisa, más comunmente Fibonacci (1170-1240) como seguramente, matemático más importante de la Edad Media, ya que a parte de la difusión de los métodos algorítmicos de árabes e hindúes, hizo importantes aportaciones conocidas, como son la serie de Fibonacci o el afamado número áureo. (Figura 5)

Las proporciones que garanticen unas construcciones seguras cobran gran importancia en ésta época, tanto que la mayoría de secretos de las "logias" son numéricos. Según cita Heyman (HEYMAN 2004), el primer acercamiento o enfoque racional hacia una ciencia de la construcción, se sitúa en la discusión de Mignot, y las reglas de su "logia" con las utilizadas en la construcción de

la catedral de Milán. Ésta discusión acabó con la conocida cita, "*ars sine scientia nihil est*" por parte del ya nombrado Mignot, la cual quiere decir, "*la práctica no es nada sin la teoría*".

#### 1.4. En los siglos XV-XVIII

Este período se conoce como el primer acercamiento de los métodos matemáticos y mecánicos para la solución de problemas estructurales, para conseguir que cierta estructura sea utilizada para soportar las cargas que actúan sobre ella.

Naturalmente, aun la componente teórica es bastante baja, ciertas proporciones de dimensionado y un diseño geométrico estable, dejando el mayor peso a las partes prácticas y experimentales.

Un gran pionero fue Leonardo Da Vinci ( Vinci 1452-Amboise 1519) que aparte de otras ramas de la ciencia, dedicó alguno de sus tratados a la "teoría de estructuras", como el estudio del comportamiento de vigas o por ejemplo la máquina que fabricó con la cual conseguía medir el límite elástico de un cable.

Otro ejemplo de la inclusión en este inicio de la parte teórica en el ámbito estructural es la obra de Andrea Palladio (Padua 1508- Maser 1580), con su tratado de arquitectura, "QUATTRO LIBRI DELL'ARCHITETTURA", donde aparecen propuestas de cerchas para la construcción de puentes muy parecidas a las que utilizamos en la actualidad. El ejemplo más famoso es la cercha de madera propuesta para el puente Cismone.

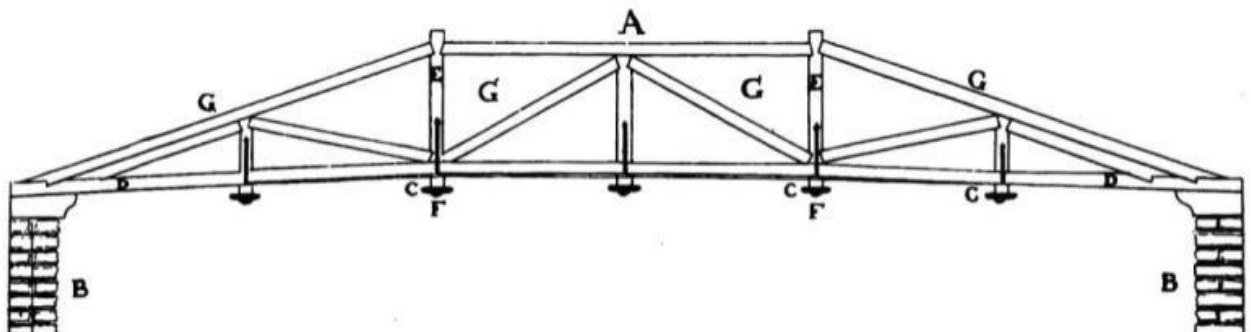


Figura 6. Cercha propuesta por Andrea Palladio sobre el río Cismone en "Los cuatro libros de la arquitectura"

Dando importancia a esta tipología y sentando las bases para su empleo, que tendrá su auge en la Revolución Industrial, con la aparición del hierro y del acero. ( finales del siglo XVIII-principios del siglo XIX).

Pero si de alguien tenemos que hablar como actuante decisivo en el ámbito del estudio de las estructuras es de Galileo Galilei (Pisa 1564- Florencia 1642). En su obra "DIÁLOGOS SOBRE DOS NUEVAS CIENCIAS" de 1638 aparece la primera teoría de vigas formulada, así como su posicionamiento en contra de la ya citada teoría medieval de proporciones en cuando al "proyecto de estructuras".

El propio Salviati cita: "Por tanto, Sagredo; abandonad esta opinión que mantenéis,(...) Porque puede ser demostrado geoméricamente que las mayores son siempre proporcionalmente menos resistentes que las más pequeñas". Refiriéndose a las máquinas y a las estructuras. (HEYMAN 2004)

"Se puede considerar por tanto a Galileo como el introductor del paradigma de la resistencia en el análisis estructural"( REY, 2013)

La obra consta de 5 diálogos, de los cuales cada uno dura 1 día y cuyos protagonistas son tres personajes imaginarios que muestran la evolución del pensamiento del propio Galileo: Salviati, que habla en boca de Galileo; Sagredo, un Galileo de joven; y Simplicio, Galileo muy joven.

El problema más famoso de Galileo en sus "Diálogos" tiene lugar en el segundo día, donde trata de hallar la resistencia a la rotura de una barra en ménsula. Es de éste problema del que Galileo prueba la existencia de un tamaño máximo de un elemento estructural, ya que al variar de tamaño una estructura de forma similar, la resistencia aumenta el cuadrado del canto, mientras que el peso aumenta con el cubo. Por lo que las tensiones crecen de forma lineal.

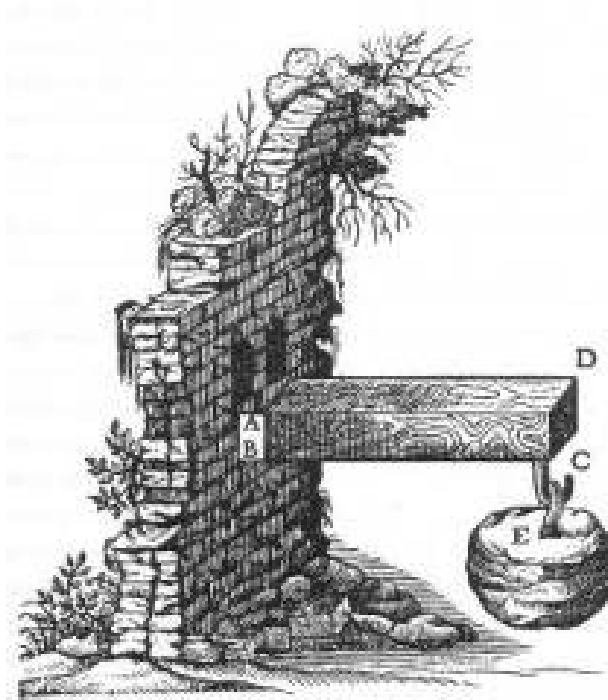


Figura 7. La viga en ménsula de Galileo

De esta forma Galileo invalida las reglas de proporción utilizadas hasta la fecha, revolucionando así el ámbito de la construcción, y centrando, finalmente, la atención en el análisis de la resistencia de los materiales mediante el cálculo de tensiones.

Así, gran parte del período entre los siglos XVII-XVIII fue dedicado por varios científicos a corregir el trabajo realizado por Galileo, el cual era incorrecto en varios aspectos, como las reacciones en el apoyo de la ménsula que fueron obviadas.

Posteriormente, en 1660, Robert Hooke (isla de Wight, 1635- Londres, 1702) formulará la ley de la elasticidad, la cual establece el modelo lineal de comportamiento para materiales elásticos, proporciones entre tensiones y deformaciones. Más conocida como Ley de Hooke que será confirmada por Christiaan Hygens.

Con esta idea de corregir y seguir el trabajo empezado por Galileo, Edme Mariotte (París, 1620-1684) realizó ensayos sobre vigas bi-apoyadas y bi-empotradas a tracción y a flexión. Descubriendo que la carga de colapso de una viga empotrada en sus extremos era justo el doble que la misma en una viga apoyada. Lo que también destacó fue la imposibilidad de relacionar sus resultados con los de Galileo, suponiendo que la inextensibilidad de los materiales citada por Galileo era incorrecta. "Incluso los materiales más duros debían mostrar algún alargamiento al ser carga-

dos,(...) había un alargamiento máximo que podía imponerse a un cierto material, y la fractura se produciría si este límite se sobrepasaba." ([HEYMAN 2004](#))

Esta discrepancia entre Mariotte y Galileo, da lugar a que varios autores se interesen en el asunto. Por ejemplo, Gottfried Wilhelm Leibniz (Leipzig, 1646- Hannover, 1716), que después de estudiar las teorías inextensibles y extensibles de los citados autores, da la razón a Mariotte. Incorporando su aportación en lo relativo a una distribución triangular de tensiones con el eje neutro en la parte inferior.

Así un amplio número de estudiosos dan sus aportaciones, cambiando partes de las anteriores a lo largo de estos años. Resaltando por ejemplo a Antoine Parent (París, 1666- 1716) que en 1713 corrige la consideración de la posición del eje neutro y plantea teóricamente el equilibrio de fuerzas horizontales, verticales y de momentos en la sección, el cual será confirmado posteriormente y es como normalmente lo concebimos nosotros.

Otro gran influyente, indudablemente, fue Sir Isaac Newton (Lincolnshire, 1643- Londres, 1727) con la Ley de la Gravitación Universal y las Leyes de la Dinámica.

El gran matemático Leonhard Euler (Basilea, 1707- San Petesburgo, 1783) que en 1744 obtiene la ecuación diferencial de cuarto grado a partir de la sugerencia de Bernoulli en su libro sobre el cálculo variacional.

Varios miembros de la familia Bernoulli, como el estudio conjunto del nombrado Euler con Daniel Bernoulli (Groninga, 1700- Basilea, 1782) en torno a la elasticidad, llegando a formular en 1750 la Ecuación Euler-Bernoulli para vigas.

Citar las aportaciones de Charles-Augustin de Coulomb (Angumela, 1736- París, 1806) con su ensayo "[ESSAI SUR UNE APPLICATION DES MAXIMIS REGLES ET DE MINIMIS A QUELQUES PROBLEMES DE STATIQUE RELATIFS A L'ARCHITECTURE](#)", que fue el primer documento en utilizar cálculos diferencial e integral para el cálculo de vigas, arcos y tensiones en el terreno.

Por último, el "Tratado de Mecánica Analítica" de Joseph-Louis Lagrange (Turín, 1736- París, 1813). En el que completa y une el saber anterior a la materia e introduce las ecuaciones diferenciales en el campo de la Mecánica.

### 1.5. En los siglos XIX-XX

En éste siglo XIX, un espectacular cambio en la tecnología de la construcción ocurre por la coincidencia de 3 factores que juntos provocan lo que se conoció como Revolución Industrial.

1. El primero de éstos factores es la invención de la máquina de vapor (Watt,1785), la industrialización y el ferrocarril. (Figura 8)
2. El segundo es la aparición de una serie de materiales, la fundición en 1779; posteriormente el hierro pudelado, buena resistencia a tracción; y finalmente, el acero (Bessemer, 1855).
3. El tercero y último, es la sustitución del método medieval de prueba y error citado, por el método científico. Lo cual produce una transformación en el conocimiento del comportamiento de las estructuras.





Figura 8. Invención de la máquina de vapor (Watt, 1785)

Esta evolución tiene una parte más teórica desarrollada por científicos como Navier, Cauchy, Castigliano, Mohr, Rankine y Culmann; gracias a su estudio, se consigue comprender de una manera más completa el comportamiento resistente de las estructuras y permite su cuantificación de forma segura.

Como hemos dicho, es en éste siglo cuando aparece una mayor consciencia sobre el conocimiento de lo resistente, considerándose 1826 como fecha clave del nacimiento de la Teoría de Estructuras como rama independiente, y a Claude-Louis Navier (Dijon, 1785- París, 1836) como principal precursor de ésta.

Se le otorga tal título sus contribuciones de gran importancia. En su "Resumé des Leçons" ( 1826) formula una teoría de análisis estructural, así como su parte práctica en las teorías de flexión, planteándolas tres condiciones de equilibrio, que como conocemos son: Fuerzas verticales, fuerzas horizontales y momentos; colocando el eje neutro forzosamente en el centro de gravedad de la sección transversal.

Posteriormente, otros muchos estudiosos citados anteriormente ayudaran a completar ésta evolución.

Esta Teoría de Estructuras como rama independiente, que recoge y ordena todo el conocimiento producido hasta la fecha, se desarrolla durante este siglo junto con sistemas estructurales específicos dependientes de los nuevos materiales de construcción empleados.

El segundo cuarto de siglo está dominado por esta teoría de flexión citada, dando lugar a un modelo estructural y utilizando las ecuaciones diferenciales parciales de la curvatura de las deformaciones dependiendo de las condiciones de contorno del elemento, lo que permitía a los ingenieros crear modelos de estructuras.

Muy ligado el interés en el cálculo estructural con la aparición del citado ferrocarril, debido a que fuera de Reino Unido, el hierro no era un material muy abundante y era necesario economizar su uso en puentes y demás obras civiles.

Así, continua la aparición de nuevos teoremas y mejorados en cuanto al cálculo estructural. Por ejemplo, William J. Macquorn Rankine (Edimburgo, 1820- Glasgow, 1872) en su publicación de el "Manual of Civil Engineering" de 1861. Donde aparecen los tres tipos de comprobaciones clásicos, que son resistencia, rigidez y estabilidad.

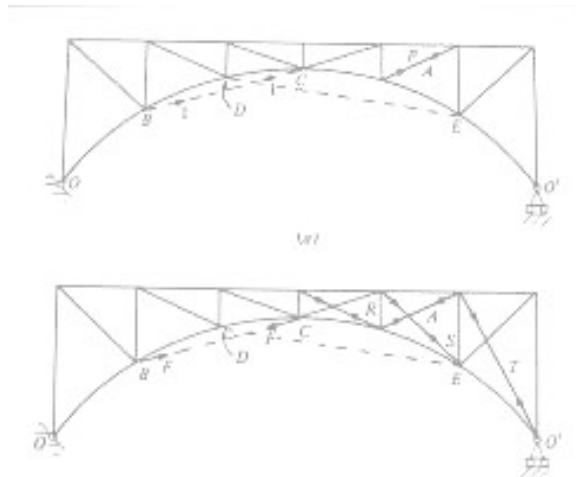


Figura 9. Entramados triangulados utilizados por Charlton para explicar la teoría de Maxwell

Otro gran aporte de la época, fue el de James Clerk Maxwell (Edimburgo, 1830- Cambridge, 1879). Él publica el que podría estar considerado el primer método sistemático de análisis de estructuras estáticamente indeterminadas. Más adelante, presenta el para nosotros más conocido por diagrama de Maxwell-Cremona. Que se trata de un diagrama de fuerzas internas para cerchas.

Christian Otto Mohr (Wesselburen, 1835- 1918) también realiza aportaciones, sobre todo para hallar las deformaciones en vigas en su "Método de las cargas elásticas o la Viga Conjugada".

Finalizando el siglo XIX, ya existen avances importantes en cuanto a la Teoría de Estructuras, pero ahora, los problemas se centran en la dificultad para resolver grandes sistemas de ecuaciones, lo que condiciona el tipo de estructuras construibles, la mayoría de geometrías simples y con pocos grados de hiperestaticidad.

Durante el principio del siglo XIX el análisis estructural se caracteriza por un avance significativo en sus objetivos científicos. [\(REY 2013\)](#)

Aproximadamente en 1915, con el descubrimiento del hormigón armado y su auge a nivel constructivo, produce la creación de una Teoría de Pórticos. Así como con el desarrollo de la construcción de rascacielos en 1920-30, que el Método de las fuerzas y el de los desplazamientos alcanzan su máxima popularidad. [\(REY 2013\)](#)

Pero realmente, la verdadera evolución llega con los métodos iterativos, métodos que tratan de resolver los problemas mediante la utilización de sistemas de ecuaciones.

Así, en 1930, aparece el Método de Cross formulado por el propio Hardy Cross (Virginia, 1885-1959). Este método revolucionó el análisis de las estructuras de pórticos de hormigón y es considerado una de las más grandes aportaciones al análisis de estructuras hiperestáticas. [\(REY 2013\)](#)

El método de Cross, lo que intenta es una simplificación, con una pérdida de precisión pero aun así consiguiendo soluciones suficientemente precisas, mediante un proceso de distribución de momentos simple, para lo que hasta entonces existía en la época, consiguiendo de esta forma una popularidad creciente en cuanto a la utilización del hormigón armado como material estructural, ya que con la simplificación, evitaba la necesidad del uso de ordenadores para la resolución del cálculo.

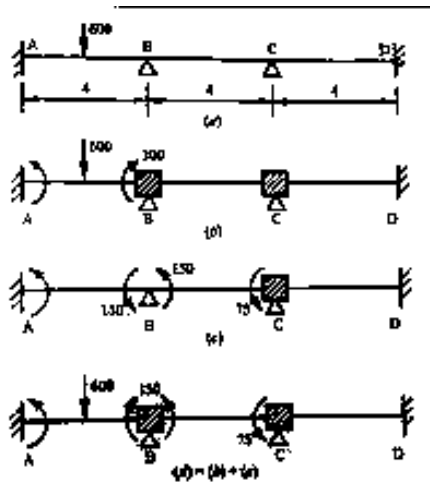


Figura 10. Primera etapa proceso Método de Cross

Este método fue el mayoritariamente utilizado hasta 1960 aproximadamente, fecha que coincide con la aparición del Método Matricial y el de los Elementos Finitos, así como con la aparición de los primeros ordenadores, que eliminaban el problema de la resolución de complejos sistemas de ecuaciones.

El Método Matricial, como hemos dicho tuvo su auge con los ordenadores que disipaban la dificultad en la resolución de sistemas de ecuaciones que produce.

$$\begin{Bmatrix} F_1 + R_1 \\ F_2 + R_2 \\ \dots \\ F_n + R_n \end{Bmatrix}_G = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}_G \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{Bmatrix}_G$$

Figura 11. Ecuación general del Método Matricial

El funcionamiento de este método, consiste en una simplificación de la estructura en elementos lineales, conociendo su rigidez. A la estructura se le asigna la conocida matriz de rigidez, la cual relaciona los desplazamientos de los nudos con las fuerzas aplicadas exteriormente a la estructura mediante la superior ecuación general.

Esta ecuación (Figura 11) consta de las siguientes partes, "F" equivale a las fuerzas exteriores aplicadas en la estructura y "R" se asocia a las reacciones desconocidas producidas en la estructura. Por otro lado tenemos "δ", que representa los desplazamientos producidos en los nudos.

Resumiendo, aplicando las ecuaciones de equilibrio en los nudos de la estructura conseguimos el sistema de ecuaciones del que se basa la matriz.

Hasta este punto, el cálculo de las estructuras se realizaba normalmente con el Método de Cross explicado anteriormente, totalmente manual, lo que nos podemos hacer una idea de lo dificultoso y duradero que era realizar el cálculo de las estructuras en digamos simplemente un edificio de viviendas, con el aumento de costos que implica el alargar los permisos de trabajo.

Vemos su gran importancia en el hecho de que, hoy en día, muchísimos programas informáticos de cálculo de estructuras funcionan con la utilización de éste método.

El Método de Elementos Finitos, es por decirlo de alguna manera el último gran descubrimiento en cuanto al cálculo de estructuras. Sus creadores fueron M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin y L.J. Topp.

Este es un método numérico, que como su propio nombre indica, parte de la idea de dividir un objeto complejo en partes menos complejas.

Es decir, "un elemento se divide en un sistema equivalente formado por elementos más pequeños (elemento finitos) interconectados en al menos dos puntos en común (puntos nodales) y/o líneas de contorno o superficies de contorno" ([REY 2013](#))

Un cuerpo o estructura, se divide en un número de subdominios o elementos finitos. Estos elementos, tiene una serie de puntos conocidos como "nodos", que pueden pertenecer a un mismo elemento finito o ser adyacentes al siguiente pudiendo de ésta forma pertenecer a dos elementos. La suma de los nodos se denomina como "malla". Cabe resaltar que a mayor número de nodos, mayor precisión en el resultado obtenido.

Podemos hablar de 3 tipos de elementos finitos:

1. Unidimensionales (líneas)
2. Bidimensionales (superficies)
3. Tridimensionales (volúmenes)

Y la citada "malla" es creada por programas generadores de mallas.

El proceso a seguir, es primero el cálculo de desplazamientos y, posteriormente, mediante relaciones de movimiento, las deformaciones y las tensiones. Todo esto como hemos dicho mediante medios informáticos.

La gran aceptación hacia este nuevo método radica principalmente en que permite el análisis y cálculo de cuerpos con infinidad de formas, sean estas irregulares, arbitrarias, o no lo sean.

Además, aparte del cálculo de estructuras, el método de elementos finitos, también tiene aplicación en el diseño de productos y aplicaciones industriales. Y en la simulación de sistemas físicos complejos.

La aceptación al principio fue difícil, ya sea por la sistematización que se había alcanzado con los métodos anteriores o por el gran esfuerzo económico que se debía realizar por la necesidad de computadoras.

Con el tiempo y con la consecuente mayor accesibilidad hacia los sistemas informáticos, era cuestión de tiempo que éste método creciera dentro de los campos donde tiene cabida. Así, en la década de los 70, aparecen los primeros programas informáticos de elementos finitos, como son Ansys o Abaqus, que aún hoy en día continúan evolucionando entre nosotros.

El Análisis Plástico de estructuras, se comienza a investigar en éste ámbito, como podemos ver en el caso de Kazinczy, que estudió a partir de 1914 deformaciones en vigas de acero empotradas en muros de carga, definiendo las conocidas "rótulas" como los quiebros que producía una viga empotrada de manera remanente. Encontró tres de éstas en la viga empotrada y de su experimento extrajo que hasta que no se producían las tres rótulas no colapsaba la viga.

Otro estudio fue el realizado por Maier-Leibnitz. Que se trataba de una viga continua sobre tres apoyos, centrándose principalmente en el contacto con el apoyo central.

En una ponencia realizada en un Congreso en Berlín en 1936, Gvozdev, presentó teóricamente los teoremas fundamentales y que gracias a Prager tenemos constancia de éstos: [\(REY 2013\)](#)

1. Es necesario contar con un material dúctil y del cumplimiento de las ecuaciones de equilibrio
2. Condición de cedencia: las tensiones internas no deben superar la tensión límite de cedencia del material.
3. Debe producirse algún tipo de mecanismo de deformación, las citadas rótulas, para el colapso de la estructura.

Éstos teoremas son de suma importancia, ya que de ellos el propio Gvozdev extrae los tres Teoremas de la Plasticidad:

1. Teorema de la Unicidad: Si se cumplen las tres condiciones citadas anteriormente la carga de colapso tiene un valor definido y calculable.
2. Teorema de la Inseguridad: Para que la carga de colapso calculada sea segura es necesario que exista equilibrio.
3. Teorema de la Seguridad: Obteniendo unos esfuerzos que equilibren las cargas exteriores y cumpliendo la condición de cedencia, obtendremos un valor seguro de la carga de colapso.

#### 1.6. Siglo XXI

Desde la aparición el pasado siglo de los ordenadores utilizados para el cálculo estructural, y su actual potencial que hacen hoy en día, un mero trámite el cálculo de estructuras complejas, ha cambiado mucho la manera de proyectar, abriendo un gran número de opciones a cada proyecto, ya que podemos obtener diferentes comportamientos con distintos sistemas estructurales en un tiempo mínimo.

En éste tiempo, no se han desarrollado nuevos métodos de cálculo distintos a los tratados anteriormente, centrandó en éste caso, el esfuerzo en optimar los programas existentes consiguiendo cada vez resultados más exactos.

El desarrollo también ha estado en el estudio de los principales materiales de construcción actuales, hormigón y acero.

Se cree que, como sucedió anteriormente con la aparición del hormigón armado, no sea hasta la aparición de un nuevo material con mejores características en cuanto a la construcción, que se antoje necesario desarrollar nuevos métodos de cálculo y de análisis estructural para aprovechar todas sus características.

Hasta entonces, sigamos perfeccionando lo que tenemos.

## 2. LA EVOLUCIÓN DE LOS MÉTODOS DE EXPRESIÓN GRÁFICA DE LAS ESTRUCTURAS

### 2.1. Introducción

Análogamente a la evolución en los sistemas de cálculo de estructuras, la evolución en cuanto a la representación gráfica de la arquitectura ha tenido un avance bastante lento desde sus inicios, basándose estos principalmente en la utilización de sistemas modulares para proyectar desde la antigua Grecia.

Al igual que el cálculo de estructuras, hasta la Revolución Industrial, no se separaron de ésta forma de proyectar modular que posteriormente en el Renacimiento se recuperará aunque con algunos cambios como por ejemplo la conocida proporción áurea que fue una de las bases desde entonces hasta construcciones del mismo siglo pasado.

En resumidas cuentas, la manera de proyectar y por lo tanto de expresión de la arquitectura ha estado basada en sistemas de proporción durante el mayor tiempo conocido y solamente se ha separado de esta "atadura" en los últimos años, con la aparición de sistemas informáticos y de los ya citados en anteriores ocasiones ordenadores personales.

Es en la segunda mitad del siglo XX cuando, con la aparición de procesos de diseño paramétrico y de representación gráfica digital, la aparición de los programas de dibujo CAD (Computer-Aided-Design) lo que ha propiciado éste desarrollo de manera separada a los tradicionales sistemas proporcionales.

Hoy en día los avances en los sistemas informáticos y por consiguiente en los procesos de diseño y de representación suceden a una velocidad pasmosa. Es por esto que formas de representación que se han utilizado durante un periodo prolongado de tiempo quedan en unos meses obsoletas completamente.

El último avance de nuestros tiempos son los sistemas de trabajo BIM (Building Information Modeling) que permiten trabajos conjuntos sin la necesidad de la presencia física lo que ha provocado un proceso evolutivo en la forma de proyectar y de representar la arquitectura.

### 2.2. Los orígenes

Como todos en un mayor o menor grado conocemos, las primeras representaciones del mundo que nos rodea nos conducen a las pinturas rupestres.

En cuanto al mundo de la arquitectura, podemos calificar como las primeras representaciones de procesos constructivos y métodos de trabajo las que aparecen en ciertos jeroglíficos egipcios que mostraban el transporte de elementos constructivos y explicaciones sobre las canteras.

Este conocimiento se traspasó de manera directa a los griegos, y es aquí cuando Euclides (325 a.C.-265 a.C.) crea su obra "LOS ELEMENTOS", que son nada menos que los fundamentos de la geometría griega más una sistematización de toda la geometría conocida y la matemática elemental. Son 13 libros que han resistido el paso del tiempo por su correcta ejecución y solución como ninguna otra obra escrita.

Desde entonces la geometría euclídea fundará un modelo para el pensamiento occidental durante varios siglos en cuanto a la representación del espacio real debido entre otras cosas a su claridad y su coherencia.

Otro griego sobresaliente en el ámbito de la geometría fue Apolonio de Perga (Perga 262 a.C.- Alejandría 190 a.C.), el cual realizó un estudio sobre las figuras cónicas que fue titulado "LAS CÓNICAS", en el que da a éstas sus nombres actuales de elipse, parábola, hipérbola...

A partir de aquí, es cuando aparecen los primeros órdenes griegos (Dórico, Jónico y Corintio), dando por primera vez una forma de proyectar en cuanto a un sistema modular.

Ya en la Roma Imperial como cita Juan Rey Rey, las normas de composición griegas fueron reutilizadas y adaptadas dando lugar a otros dos órdenes : el Toscano y el Compuesto. (REY, 2013)

De un tratado del que ya se ha hablado en el apartado del cálculo de estructuras y que por importancia debemos volver a mencionar aquí es el tratado "DE ARCHITECTURA" de Vitruvio, que desarrolla los principios generales de la proporción y se estudiará durante mucho tiempo.

### 2.3. La Edad Media

En la edad media, no existe la perspectiva lineal y las imágenes son normalmente adimensionales y bastante esquemáticas.

En ésta época, las figuras se solían disponer sobre un fondo uniforme y más o menos neutro de manera que apenas se percibía la profundidad por lo que es complicado situarlas dentro de una disposición espacial.

Es en el siglo XII se funda la escuela de traductores de Toledo, que traducían los textos al latín. De esta manera se pudo recuperar los conocimientos de los años anteriores, lo que sería muy importante en el campo de la arquitectura permitiendo el crecimiento de un nuevo estilo, el Gótico.

### 2.4. El Renacimiento

El período conocido como Renacimiento, viene precedido de un florecimiento económico de las ciudades italianas y de una idea de recuperar la cultura clásica romana.

En especial en la ciudad de Florencia se impulsó una nueva forma de ver el mundo, con esa idea de recuperación del conocimiento clásico. Además se expande la ciencia gracias a la imprenta lo que permite su fácil duplicación.

Como cita Juan Rey Rey, (REY,2013) "Los artistas y tratadistas que estudiaron a Vitruvio, como Brunelleschi, Alberti, Palladio, Bramante, Uccello, Piero della Francesca y Leonardo da Vinci, darán en el siglo XV. con los grandes sistemas y técnicas de representación gráfica, ya sea plana, volumétrica o especial."

Estos artistas del Quattrocento, buscaron el conocimiento de los fundamentos de la geometría. Encontrando la solución a problemas estructurales derivados de la representación de las formas visuales.

La perspectiva apareció, comúnmente atribuida a Filippo Brunelleschi (Florencia 1377-1466), como una forma de representar el espacio ayudando de éste modo a la representación de la arquitectura.

Gracias a los experimentos realizados por Brunelleschi, se concibe el punto de fuga como lugar geométrico donde convergen las rectas.

Durante esta época también aparecen los dibujos ortográficos como soporte visual en la fase de construcción de edificios, cosa que aún hoy en día seguimos utilizando.

## 2.5. Siglos XVII - XIX

Durante esta época, se empiezan a separar las corrientes artísticas y las técnicas en cuanto a la representación arquitectónica.

Por un lado, el artístico, continua con la idea de proyección, no medibles, lo que no tenía demasiada utilidad desde un punto de vista constructivo o técnico. Es aquí donde a lo largo del siglo XVIII se desarrolla el vedutismo, con Canaletto y sus pinturas sobre Venecia especialmente como máximo exponente.

Éste estilo se basa en vistas urbanas siempre en perspectiva.

Por el lado opuesto, aparece la geometría descriptiva, que aparece por primera vez publicada en 1799 por Gaspard Monge (Beaune, 1746-1818).

Las características principales de la geometría descriptiva son la precisión, el anonimato y la infinitud: [\(REY, 2013\)](#)

- Con la precisión se consigue poner fin a la ambigüedad de la representación gráfica. Aquí los puntos del espacio tridimensional corresponden a los del plano y viceversa.
- El anonimato se consigue ya que el punto de observación de la figura es indefinido.
- La infinitud de la geometría descriptiva elimina la profundidad, creando un sistema homogéneo, más técnico.

Por su utilidad para la representación bidimensional de objetos tridimensionales, la geometría descriptiva ha sido muy utilizada sobre todo en disciplinas como la arquitectura y la ingeniería.

## 2.6. Siglo XX

Se va a dividir en dos partes éste siglo por su ya mayor evolución en cuanto a sistemas de representación.

Es en ésta primera parte de siglo cuando aparece el uso de la fotografía con la invención de la cámara oscura. Creando una revolución en el ámbito de la arquitectura solo comparable a la producida posteriormente por la aparición de los ordenadores y los programas informáticos.



La cámara oscura está formada por una caja de paredes ennegrecidas en su cara interior (Figura 12). Una de éstas paredes tiene un orificio en el centro con un vidrio desastrado en su cara opuesta. Es aquí donde aparece la imagen invertida de los objetos colocados frente al orificio. [\(REY, 2013\)](#)

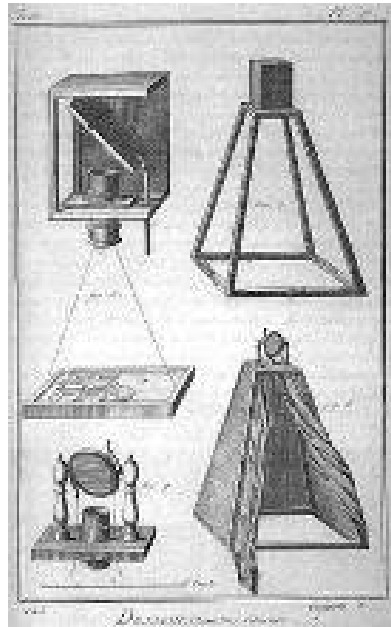


Figura 12. Esquema de una cámara oscura del S. XVIII

A partir de la utilización de fotografías a principios de siglo, aparecerá posteriormente el fotomontaje, con la utilización mixta de éstas y de dibujos en perspectiva, permitiendo gran libertad creativa de expresión tanto gráficas como espaciales.

Estos collages y montajes fotográficos pronto se utilizarán para la representación en proyectos arquitectónicos modernos como es el caso de la conocida imagen del proyecto de torre de la estación de la Friedrichstrasse en Berlín de Mies van der Rohe en 1919.

Posteriormente, ya en la segunda mitad, sobre los años 70, ésta técnica también será utilizada de manera más utópica por corrientes como el conocido Archigram entre otros.

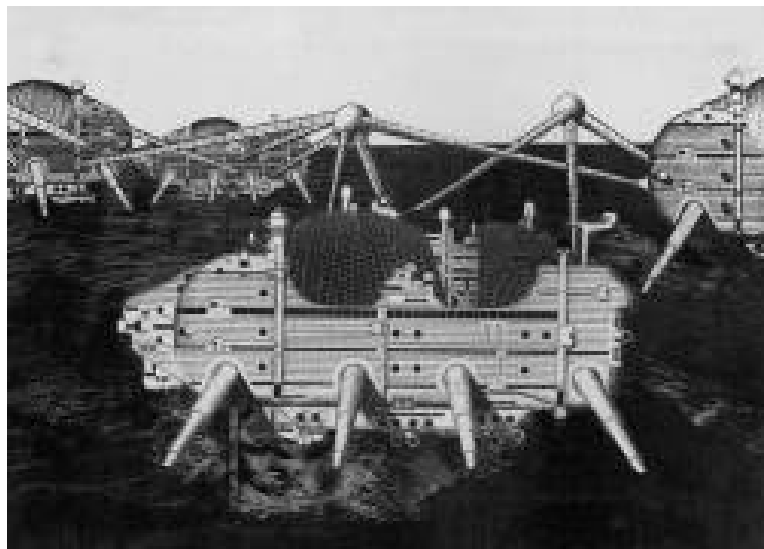


Figura 13. Walking City, Archigram

Durante ésta época, se produce un abandono del ángulo recto conocido en el racionalismo clásico, y se empiezan a integrar más de un sistema geométrico en el mismo proyecto.

Es en éste punto cuando empiezan a aparecer superficies de doble curvatura en los proyectos. Los precursores son Gaudí y durante la primera mitad del siglo autores como Torroja, Candela y Neri continúan ésta corriente. Creando un germen en cuanto a la forma gracias al control geométrico y el proceso de ejecución de formas espaciales que será recogido posteriormente en arquitecturas contemporáneas

La segunda mitad de siglo supone una revolución en cuanto a la representación gráfica. Aparecen varias corrientes estilísticas posmodernas, como el deconstructivismo o la arquitectura high-tech.

Pioneros en cuanto a estas vertientes son Peter Eisenman con el Aronoff Center (1988); Frank Gehry con el Museo Guggenheim de Bilbao (1987); Daniel Libeskind con la Jewish Extension del Museo de Berlín (1989). En todos éstos proyectos se crea una forma arquitectónica a partir de geometrías complejas, considerando así la utilización de un nuevo lenguaje formal.

Algunos incluso más radicales en la idea de priorizar la forma fueron Rem Koolhaas, Bernard Tschumi o Zaha Hadid, creando una nueva forma de representar la arquitectura, añadiendo iniciativas de innovación tecnológica.

Una vez incluidos los ordenadores personales y con ellos los nuevos sistemas de representación asistidos por ordenador, aparecen formas complejas que van aumentando sus grados de indeterminación y aleatoriedad.

Con éstos grados de complejidad espacial resulta imposible representarlas y concebirlas mediante los sistemas de representación ideados por Monge. Dando paso a un espacio tectónico y topográfico donde las tres coordenadas espaciales sufren una continua variación. [\(JUAN REY REY, 2013\)](#)

En la década de los 90, con la incorporación de los medios informáticos, que veremos posteriormente, y la utilización del cálculo matemático en cuanto a definición espacial de superficies NURBS, se ha tratado, además de concebir y controlar estas espacialidades, una construcción coherente y con criterios racionales de las mismas. [\(JUAN REY REY, 2013\)](#)

Es por esto que ésta década marca un momento de cambio en cuanto a los métodos de representación gráfica arquitectónica, aumentando el uso de los sistemas de representación digitales en detrimento de los tradicionales.

A continuación se explicará brevemente los métodos de representación asistidos por ordenador:

#### 1. Curvas y superficies de Bézier:

Las curvas de Bézier aparecen como una necesidad de conseguir un procedimiento que permitiese construir formas complicadas fuera de las superficies cuádricas anteriores.

Fue el ingeniero francés del mismo nombre Pierre E. Bézier (París 1910-1999) el que desarrolló para Renault un sistema para el trazado de dibujos técnicos. Esto consistía en unir dos puntos con una curva definiendo la curva a partir de los unos elementos esenciales que serían dichos puntos o nodos y un punto de control.

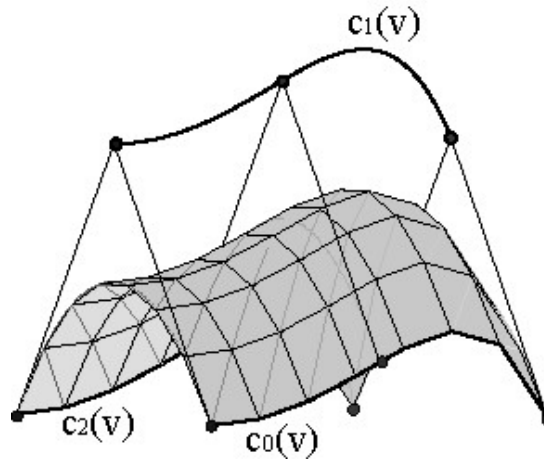


Figura 14. Superficie de Bézier, creada a partir de su curva.

Este método de descripción matemática de las curvas se introducirá en los programas de gráficos generados por ordenador como el ya conocido CAD.

El método, desde un inicio fue para un mejor diseño en piezas de carrocería, por lo que el método no se estancaba en elementos bidimensionales sino que era igualmente válido para la generación de superficies.

Más tarde, Paul de Casteljaou (Besançon, 1930) utiliza el paraboloides hiperbólico, determinando ésta superficie por cuatro puntos que de alguna forma controlan la superficie total. Se trata de un método que se basa en cuatro puntos que rigen y una formación de la superficie basada en la interpolación lineal.

Estos dos métodos expuestos, continuaron su expansión a través de las NURBS (Non Uniform Rational B-splines), que fueron incluidas en software de CAD para empresas de fabricantes de coches.

Las NURBS han traído la posibilidad para los proyectistas de trabajar con formas libres sin la necesidad de conocer las ecuaciones matemáticas ni los conocimientos geométricos de las formas que estaban creando. Desarrollando así el diseño basado en formas irregulares.

Uno de los ejemplos de lo que posibilita lo citado es el proyecto de Frank Gehry (Toronto, 1929) para el Guggenheim de Bilbao (1997), el cual, a partir de unos garabatos sobre papel a lo que se le añade la técnica informática de las superficies de Bézier y las NURBS se consigue llegar al resultado conocido por todos.

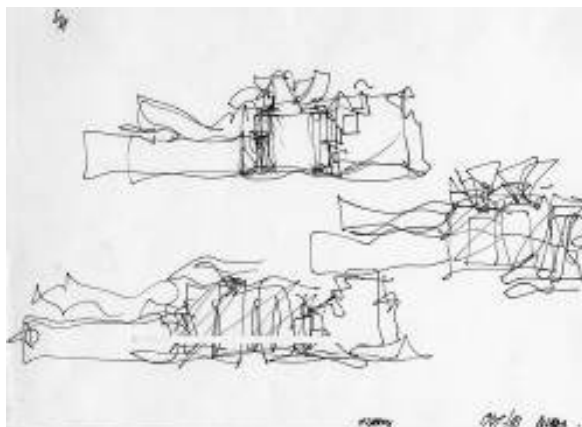


Figura 15. Dibujos de la idea para el Guggenheim de Bilbao, Frank O. Gehry

## 2. Sistemas CAD (Computer Aided Design):

Estos sistemas han sido un punto de inflexión para las ramas de la ingeniería, la arquitectura y la construcción, no solo por el aumento de rentabilidad en cuanto a trabajo a la hora de dibujar los planos, sino también por la posibilidad de la visualización de en tercera dimensión de lo proyectado.

El proceso evolutivo de los sistemas CAD discurre desde los años 50 del siglo XX hasta nuestros días.

El primer CAD se utilizó para las Fuerzas Armadas de Estados Unidos. Más tarde, durante la siguiente década, se utilizó para el diseño de interiores de oficinas. En 1968 los sistemas CAD 2D como lo podemos ver hoy en día de manera muy básica aparecieron operativos.

Durante la década de los 70, aparecerán muchas de las firmas actuales como por ejemplo CATIA. También la posibilidad ya de algunas de las posibilidades de las visualizaciones en 3D aparecen durante éstos años.

En los años ochenta aparece en escena Autocad, con la idea de crear un programa general de CAD, logrando un gran reconocimiento en pocos años sobre todo en los campos de la arquitectura y la ingeniería.

La siguiente década es la de total asentamiento de las visualizaciones en 3D y la total consolidación de los programas de CAD en estudios de ingeniería y arquitectura.

Por último, ya en acercándonos a nuestros días, en la primera década del siglo XXI, se mejoran de manera notoria los programas de CAD 3D y CAD. Añadiendo soluciones específicas para las diferentes ramas interesadas e incorporando poco a poco las NURBS, el control paramétrico y el BIM.

El impulso de los programas CAD, obviamente, viene respaldado por el hecho de que los programas se hacen más potentes y que sus precios empiezan a ser mucho más asequibles para cualquier estudio.

Los sistemas de visualización en 3D se han ido haciendo más populares debido a la necesidad de representación no solo en plano de objetos que tienen las citadas 3 proyecciones y al hecho de que una vez realizado el diseño en 3D, se pueden obtener los planos en 2D, con la ventaja de que toda la información sale del mismo modelo consiguiendo de ésta forma una concordancia totalmente real.

## 3. BIM:

Los programas de BIM (Building Information Modeling) añaden a los modelos tridimensionales información paralela a la propiamente geométrica, creando un sistema virtual de información, como puede ser las propiedades físicas de los materiales, sus precios en el mercado, etc.

De ésta forma se puede conseguir información detallada y que se actualiza automáticamente, como por ejemplo el costo total de un edificio o de partes de éste de manera inmediata.

Además de las facilidades en cuanto a la generación de planos, que como se ha dicho antes se pueden sacar del modelo en 3D.

#### 4. Diseño paramétrico:

Este tipo de diseño se basa en la creación de geometrías a partir de parámetros iniciales y las relaciones formales establecidas entre ellos. ([REY, 2013](#))

Se utilizan algoritmos matemáticos para generar relaciones matemático-geométricas para crear el diseño y las posibles soluciones a modificaciones dependiendo de los parámetros iniciales.

Es una herramienta muy útil para proyectos arquitectónicos de elevada complejidad formal, consiguiendo una mayor control sobre el mismo y optimizando los recursos y los plazos de realización.

### 3. CRÍTICA DE LAS ESTRUCTURAS

#### 3.1. Introducción

A lo largo de la historia, numerosos autores han "criticado" la arquitectura desde el punto de vista compositivo y de la estructura. Para la exposición de la crítica de edificios, nos hemos centrado en la forma utilizada por Peter Eisenman en su libro "[DIEZ EDIFICIOS CANÓNICOS 1950-2000](#)".

En ésta publicación, Eisenman afirma que son los propios edificios los que constituyen la fuente de ideas en arquitectura, explicando de éste modo cómo cada edificio debe ser "criticado" de una manera diferente dependiendo de sus aspectos particulares.

Eisenman, en su libro, trata de obras canónicas, pero canónicas desde el punto de vista de bisagra entre una época, arquitecturalmente hablando, y otra.

Nuestra base crítica se va a fundar en los elementos que el autor citado ha utilizado para hablar de éstos edificios canónicos, ya que nuestra intención no es la de buscar una nueva bisagra que añadir a la lista de Eisenman.

Por último, decir que cuando hablamos de crítica, se trata de un ejercicio de análisis del edificio tratado sin ninguna connotación negativa, explicando las variantes que le hacen diferente.

#### 3.2. La materialidad y la destrucción de la caja.

Para tratar este tema, utilizaremos de ejemplo La Escuela de Ingeniería de la University of Leicester de James Stirling que construyó junto a su socio James Gowan.

La crítica se dirige en tres direcciones:

1. El uso del vidrio:

El vidrio en el postmodernismo se utilizaba como *vacío de forma literal*, para tomar parte en las zonas ligeras o etéreas. En el caso de la University of Leicester, el vidrio se utiliza en cambio como un *sólido conceptual*, actuando en zonas de volumen como lo haría cualquier otro material de cubrición.

Además, en las zonas de su utilización se le añade fuerza de manera volumétrica como es en la zona de cubierta con la aparición de los cubos o en la fachada ventilada de la torre de oficinas que está adelantado del parapeto de ladrillo.



Figura 16. University of Leicester James Stirling

## 2. Uso de piezas modulares cerámicas (ladrillo y plaqueta cerámica)

El uso de éstos materiales para señalar la función de los cerramientos donde están utilizados. Las superficies verticales no portantes del edificio se representan con una trama horizontal.

## 3. La organización de las masas del edificio en cuanto a la composición

En el centro del edificio existen dos escaleras con sendos volúmenes con las esquinas achaflanadas, como se ha citado en la parte anterior, las plaquetas se sitúan de manera vertical, no recibiendo un tratamiento estructural. En cambio en la parte donde aparece vidrio, éste sabemos que no es estructural pero se trata de manera volumétrica otra vez dándole un concepto estructural al material liviano y no estructural al material pesado.

Estas inversiones de las propiedades convencionales de los materiales se pueden observar en varias partes del edificio.

El resumen de todo lo anterior viene a ser la desmaterialización de los materiales en la construcción, lo que hace que estos tengan que ser leídos desde un punto de vista conceptual adquiriendo características que no son propias originariamente de ese material.

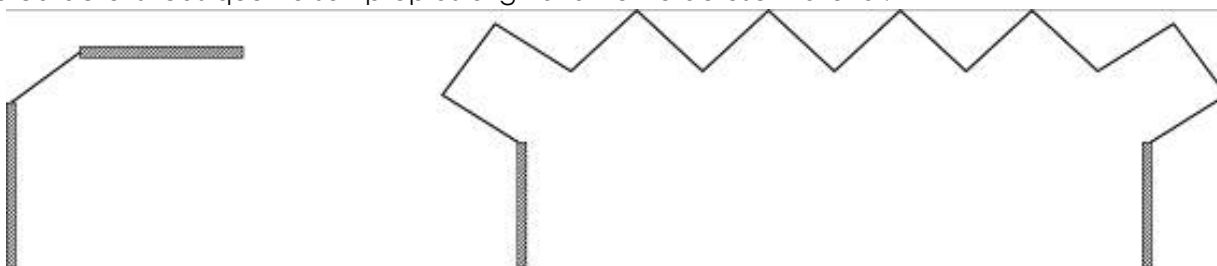


Figura 17. Esquemas de desmaterialización de los elementos.

En los esquemas superiores, se trata de explicar de manera visual lo descrito anteriormente de manera teórica.

En el esquema de la izquierda se muestra el concepto original de los materiales, con fuerza los muros y cubierta siendo éstos de hormigón o fábrica, materiales pesados originariamente. Por el contrario un material liviano, como podría ser el vidrio, ocupa lugar en el hueco creando eso levedad.

Al contrario, en el esquema derecho se muestra lo que se trata de explicar en éste punto. La utilización de materiales conceptualmente ligeros o livianos en puntos donde tradicionalmente estarían materiales pesados. En éste caso se sitúa vidrio en la zona de cubierta con una sensación de fuerza en vez de ligereza.

### 3.3. Estructura y composición como aditivo o unidad

El significado de "aditivo" en arquitectura es el de una acumulación de indicios de ideas que se superponen ya sea en cuanto a la estructura o a la composición. Un edificio decimos que puede ser aditivo cuando su todo no se lee como una entidad unitaria, sino que podemos entenderlo como la suma de partes que dan como resultado ese todo.

Estos no tienen la misma coherencia interna que la forma global.

Por el contrario, un edificio se puede ser "unidad" cuando su estructura en éste caso es continua y única en todo el proyecto. O en caso compositivo, no se trata de una adición de tropos diferentes sino que todo está compuesto como una unidad.

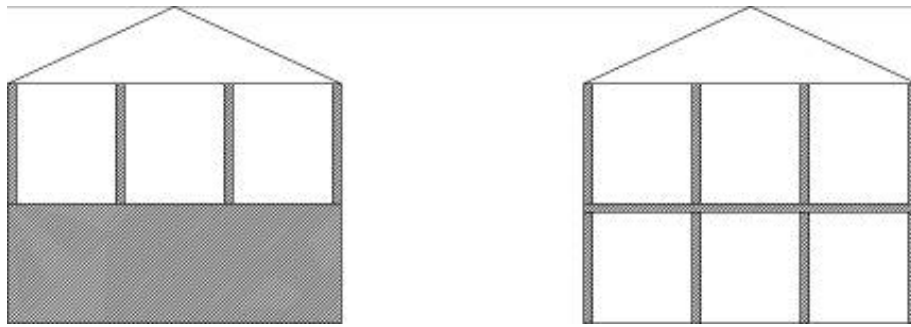


Figura 18. Esquemas de ejemplo de adición y de unidad.

En el esquema superior de la izquierda se ve un edificio estructuralmente aditivo, pues está compuesto en primera planta de muros que luego se convierten en pilares en la parte superior.

En cambio, en el derecho se podría decir que estructuralmente, al menos, sería unidad ya que mantiene la misma idea de estructura en todo el proyecto.

### 3.4. Objeto vs Espacio

El objeto se puede abstraer formalmente ya que es el contenedor del otro. Pero el caso de espacio es más complicado su análisis puesto que el espacio está formado por otros objetos o cosas, contenedores, que lo contienen.

Dicho así, el espacio queda como un ente conceptual de difícil abstracción y el contenedor u objeto es un ente formal, fácil de abstraer y analizar.

Esto nos hace ver también de otra forma el sentido arquitectural de borde en cuando al edificio, qué es ese borde, el final del espacio contenedor que separa el propio espacio interior del exterior o es contrariamente la frontera que delimita el acceso del espacio exterior al interior de nuestro contenedor.

Este tipo de definiciones tienen un carácter muy conceptual en el que influye de manera importante el subjetivismo de cada autor quiera darle a un proyecto suyo o quiera realizar en un análisis crítico.



Figura 19. Esquemas sobre el concepto de objeto y de espacio



Los esquemas superiores muestran de manera conceptual las diferencias entre lo que se concibe como objeto y como espacio, tratando también los diferentes espacios.

En el primer esquema, aparece lo que sería el objeto, el contenedor que contiene el espacio, cobrando una mayor importancia en éste caso por encima del continente que sería el denominado espacio.

En el esquema central, podemos ver cómo sería si lo primordial a resaltar fuera el espacio interior que crearía la arquitectura y el objeto sería mero contenedor de éste espacio funcionando como barrera separadora.

Barrera separadora es lo que forma el contenedor en el tercer esquema funcionando éste como separador entre el exterior del interior ya sea como concepto o como posible idea de proyecto.

### 3.5. Consideración de la estructura (Diagramas)

Para exponer la idea de éste apartado, se va a utilizar la obra de Mies van der Rohe, más concretamente su casa Farnsworth.

La idea a exponer es la de la aparición de los pilares como elementos portantes, separando los elementos de cierre de los propiamente portantes. El uso de pilares exentos consiguiendo Mies en su obra un desplazamiento desde lo abstracto hacia lo real.

También se trata de la representación de la estructura de manera opuesta a la estructura.

Para definir los distintos usos de los pilares, cabe definir las tres categorías de signos expuestas por Charles Sanders Peirce tal como nos muestra Eisenman en su libro "[10 EDIFICIOS CANÓNICOS](#)":

- Icono: En éste caso existe una similitud tanto formal como visual con su objeto.
- Símbolo: Tiene un significado cultural y convencional en referencia a su objeto.
- Índice: Describe una actividad previa del objeto.

El término "diagrama", también fue utilizado por Charles Sanders Peirce, y para él, en referencia con lo superior, es tanto un icono, pues tiene una relación visual con su objeto.

En cuanto a un pilar, tendría un doble significado, sería un icono, ya que se parece a un pilar. Pero también sería un índice de ser un pilar.

Todo esto nos podría conducir al diagrama de Mies. Pero antes que éste existen dos diagramas, los propuestos por Le Corbusier que son el Dom-Ínó y el Citrohan.

El diagrama Dom-Ínó, presenta un esquema de elementos donde suelo y techo son a nivel conceptual equivalentes con los pilares en el espacio medio. Creando un continuum con la utilización de secciones circulares en el interior y retranqueos iguales de la línea de fachada en los pilares que bordean.

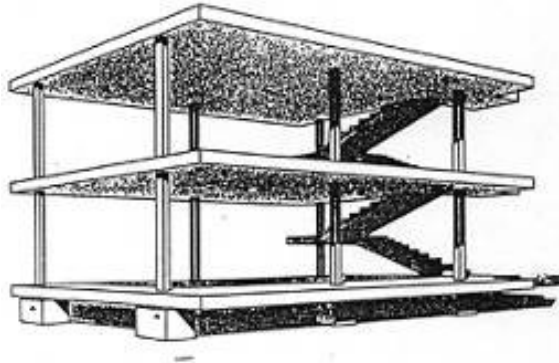


Figura 20. Le Corbusier, casa Dom-Inó, 1914

Por otra parte el esquema de Mies, definido como Diagrama de paraguas, genera una distinción en cuanto al concepto entre el plano del suelo y el plano del techo eliminando el continuum horizontal del que habla Le Corbusier.



Figura 21. Crown Hall, IIT, Chicago, 1950-56

De hecho, el cambio significativo del diagrama de paraguas visible en la casa Farnsworth es la colocación de los pilares en el exterior de los planos horizontales de suelo y techo, colgando éstos como hamacas entre los soportes o incluso de las vigas como ocurre en el Crown Hall de Chicago.

Otro tipo de diagrama a tratar son los que tienen que ver con la globalidad del edificio, diagrama icónico y diagrama simbólico.

El diagrama icónico se trata en el sentido de que el edificio, su forma, tiene una relación visual con su diagrama funcional.

Por otro lado, el diagrama simbólico, en el que la construcción funciona como una objeto diferenciado de sus funciones interiores, atendiendo al aspecto exterior.

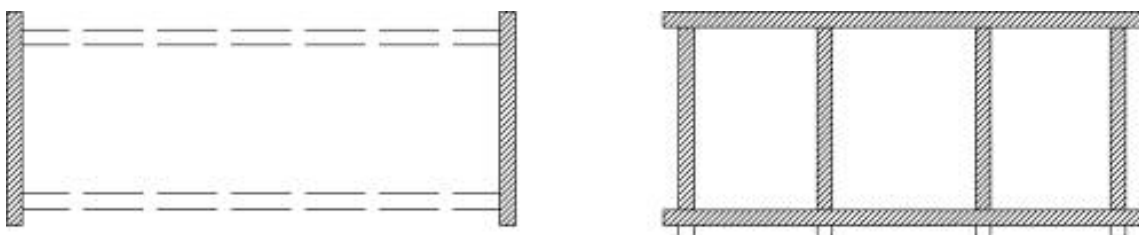


Figura 22. Esquema de diagramas de paraguas y Dom-Ino.

En éstos esquemas podemos ver la diferencia entre los dos grandes diagramas citados. A la izquierda se sitúa el denominado como esquema de paraguas de Mies van der Rohe, en el cual la estructura se coloca en los extremos y los cerramientos horizontales como serían la cubierta y el suelo están "colgados" de los primeros.

El de la derecha representa el famoso diagrama de Le Corbusier conocido como Dom-Inó en el que resalta el retranqueo de los pilares de los extremos y el continuum horizontal.

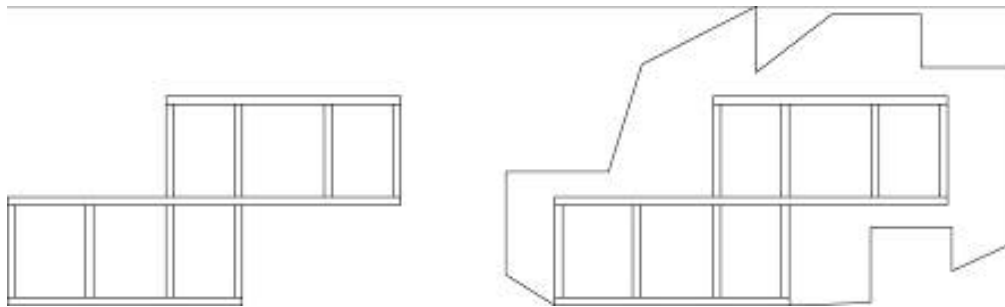


Figura 23. Esquemas de diagramas icónico y simbólico.

Estos diagramas son menos conocidos y de una mayor subjetividad. Se basan en la relación del todo del edificio con sus funciones internas.

De ésta forma podemos ver a la izquierda el citado diagrama icónico, en el cual la forma final es causa de la funcionalidad del proyecto. Por el contrario el diagrama simbólico, derecha, se basa en la forma exterior del proyecto que suele ser independiente a las funciones interiores de éste creando un símbolo y dando mayor importancia a la forma final.

### 3.6. La cuadrícula cartesiana

Relación entre la figura o forma arquitectónica del edificio y la retícula de pilares creadora de espacios.

Hay que tener en cuenta el cómo se crean las estancias y los espacios en relación a la colocación de los pilares dentro de una retícula y sus omisiones estratégicas en caso de que ésta exista.

Por el contrario, puede cobrar una mayor importancia la figura del edificio, la forma por encima de la "necesidad" de tener una retícula estructural y a causa de esto, la estructura se acople a la forma creadora.

Por ejemplo en el caso de las Très Grande Bibliothèque, Koolhaas utiliza pilares que desaparecen y aparecen al azar dependiendo únicamente de la manera de intersecar de las paredes.

### 3.7. Vacío como creador.

Para entender el vacío, podemos utilizar a Rem Koolhaas, que lo utiliza como una inversión del lleno, como una fuerza latente contenida entre los estratos de los forjados sólidos, según cita Peter Eisenman en sus ["10 EDIFICIOS CANÓNICOS"](#)

*"Los espacios públicos principales se definen como ausencias de edificio, vacíos excavados en el sólido del información" Rem Koolhaas*

---

Entonces el vacío se convierte en el lleno del edificio invirtiendo las ideas y dando la importancia a la creación del espacio y no al continente y el espacio que sea residuo de éste.

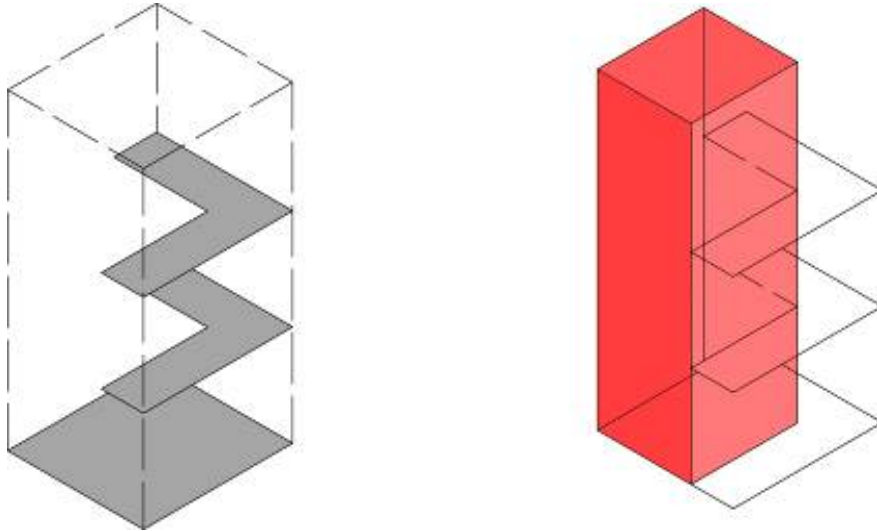


Figura 24. Esquema de vacío como creado o creador.

Ésta es una definición conceptual también, como podemos ver en los esquemas superiores el vacío se puede acatar de dos maneras proyectuales diferentes. Una sería la del esquema izquierdo, donde el vacío es creado como consecuencia de los huecos dejados por la materia, siendo aquí el motivo creador la propia materialidad del proyecto. En cambio, en el esquema derecho, vemos que la idea creadora la forma el vacío, le hueco, creando este la arquitectura que crece a su alrededor como meras necesidades frente al motivo principal que es el vacío.



### III. EDIFICIO JOHNSON WAX, FRANK LLOYD WRIGHT

#### 1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Primeramente, haremos un breve acercamiento a la situación social e histórica de cómo se llegó a que Frank Lloyd Wright fuera el encargado de la realización de éste proyecto para la fábrica Johnson & Son.

S.C. Johnson & Son es una gran empresa de ceras y pinturas situada en Racine, Wisconsin, que primeramente empezó colocando suelos de parqué.

Posteriormente, debido a las necesidades y a la gran visión empresarial primeramente de Samuel Curtis Johnson, arrancó con la idea de la cera para parqué; y posteriormente su nieto Hibbert Johnson y su padre Herbert Johnson adaptándose a los tiempos con todo tipo de materiales plásticos tanto para coches o pinturas.

Hay que tener en cuenta que la empresa estaba muy involucrada con los empleados, queriendo siempre que tuvieran un buen espacio de trabajo y que se sintieran partícipes de los éxitos de la empresa. De ahí que se interesaran por la creación de un edificio singular, con un gran ambiente de trabajo y aplicando técnicas modernas o no comunes para la época como era la introducción de aire acondicionado para el mejor estar de los trabajadores, cosa totalmente inusual.

*"Let's not try to build only a bigger business, let's not let mere size be the goal of our ambitions, let's build a finer, more perfect corporation, so as to make our chosen life's work fine, and more enjoyable."Hebert Fiske Johnson*

---

Primeramente, se encargó a J.Mandor Matson, un arquitecto local, hacer un edificio de oficinas que tuviera aire acondicionado, artístico e inspirador. La propuesta de éste no fue la esperada ni por Johnson ni por su director general, Jack Ramsey, ya que a ambos les parecía "solamente otro edificio".

Entonces, se pusieron en contacto con Louis & Brorby, una compañía de relaciones públicas de Chicago que la empresa usaba, para encontrar un nuevo arquitecto. La respuesta fue un tanto curiosa, ya que primeramente decían que el arquitecto idóneo para la tarea sería Mr. Raftery, un arquitecto que había ganado varios concursos en el tipo de arquitectura moderna que estaban buscando.

Lo curioso ocurrió cuando la compañía fue a hablar con el citado arquitecto, éste dijo que claramente le gustaría formar parte, pero que si entendía a la Johnson Company, sus deseos y sus ideales, que solo tenían una cosa en el mundo que hacer; hablar con un nativo de Wisconsin que además era el padre de la arquitectura moderna y que sería un crimen no hablar con él: Frank Lloyd Wright.

Como sabemos, en la primera década del SXX, Frank Lloyd Wright había desarrollado una filosófica fundación por su trabajo. Pero los años de la depresión en Estados Unidos, le habían dejado casi sin contratos.

Junto con su mujer, crearon Taliesin en 1932, incorporando a su casa-estudio a jóvenes aprendices, los cuales debían repartir su tiempo en el trabajo de las tierras que tenían en Taliesin y aprender arquitectura trabajando bajo la supervisión de Wright. Todo según la idea de alcanzar el grado de autosuficiencia que predicaba F.L.Wright a causa de la crisis.

Lo que le convirtió en un arquitecto conocido en el mundo, fue su visión del lugar del hombre en la naturaleza y su estilo Prairie, estilo acuñado cuando, en Chicago, él y otros arquitectos fueron conocidos colectivamente como la Escuela Prairie. Caracterizados por la horizontalidad en sus casas y su afán por abrir habitaciones en otras extendiendo el cerramiento espacial, en contraposición con la arquitectura Victoriana de habitaciones cerradas.

Dos de los altos cargos de Herbert Johnson fueron a visitar a Frank Lloyd Wright a Taliesin. En esa época, el citado arquitecto estaba realizando la primera "casa Usoniana", otra casa en California, la casa Hanna y por último la por todos conocida "Casa de la cascada" o casa Kaufmann. (Figura 25)



Figura 25. Frank Lloyd Wright, Casa Kaufmann(1937)

Fue en éste primer encuentro cuando Wright propuso por primera vez uno de los puntos de mayor tensión en la negociación; su afán por mover el nuevo edificio a las afueras, al campo donde "hay espacio para respirar". [\[FRANK LLOYD WRIGHT AND THE JOHNSON WAX BUILDINGS, JONATHAN LIPMAN\]](#)

Y digo que éste es el mayor punto de tensión en la relación del arquitecto con Herbert Johnson, ya que después de éste primer acercamiento, Ramsey, uno de los dos gerentes de Johnson, escribió una carta al propio Herbert, contándole cómo había transcurrido la reunión y hablándole sobre las posibilidades del proyecto si contrataban a Wright. Con una petición al final: "¿Le verás?", refiriéndose la celebración de una cita entre ambos.

Por supuesto que Herbert accedió a dicha cita, en la cual le gustaron las ideas de Wright, aunque no como criticó los dibujos de Matson, insistiendo en realizar un nuevo edificio y en moverlo al campo, según su famoso esquema de la descentralización o Broadacre City.



Figura 26. Broadacre city, Frank Lloyd Wright, 1934

Finalmente, Herbert despidió a Matson y Wright tendría su nuevo proyecto, pero Wright llevo al extremo la idea de Broadacre City. Hasta el punto que decidió "aceptar" el emplazamiento debido a un consejo de su mujer, Olgivanna, que le dijo: *"Give them what they want, Frank, or you will lose the job"* (*"Dales lo que quieren, Frank, o perderás el trabajo"*)

Y de ésta forma, con Frank Lloyd Wright aún reticente por el emplazamiento comenzó el diseño del edificio que analizaremos más adelante.

Pero los incidentes no terminaron en éste punto, pues posteriormente, cuando se empezaron los procesos de obra, la comisión era reacia a la permisión en los cambios que quería realizar Wright para conseguir las columnas tan finas como deseaba. Permitiéndole por el momento la construcción de las partes no estructurales del edificio.

Por si esto fuera poco, la comisión se dio cuenta que Wright nunca había recibido una licencia como arquitecto. Esto se debía a que el propio Wright no reconocía ninguna institución con poder para decidir si lo que él hacía era bueno o malo. Defendiendo que estaba suficientemente capacitado como podía verse por sus años de trabajo.

## **2. DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA**

### **2.1. Introducción**

Como todos sabemos, el complejo total de la Johnson Wax, está formado por dos edificios separados en su construcción por 10 años, aunque formalmente y conceptualmente están totalmente unidos.

Principalmente nos centraremos principalmente en el edificio de administración, ya que excedería en extensión este trabajo, no se podría atacar ambos elementos con el grado que se merecen, aunque sí que se intentará dar unas pinceladas a la citada torre de investigación.

Centrándonos ya en el edificio de administración, vamos a organizar su descripción en dos partes. Primeramente sobre su composición general y posteriormente sobre sus elementos más representativos e importantes que son las esquinas y las columnas.

Como punto final a esta introducción, cabe citar algunos puntos a tener en cuenta para el desarrollo y la comprensión del proyecto de Wright. Mirando algunos de sus proyectos anteriores al que se va a estudiar podemos deducir dos variantes en cuanto a sus edificios privados, siempre extro-



vertidos, abiertos al paisaje que les rodea. Y los edificios públicos, que normalmente se cierran a su interior, con pocas o sin ventanas aunque no por ello faltos de iluminación o angostos en su interior.

Por otro lado y como último punto a destacar, ya conocemos de la oposición de Frank Lloyd Wright al estilo Victoriano de la época y a su afán por los espacios abiertos sin cerramientos que encasillen las estancias y esa persecución por romper la caja a la que Wright se refería en numerosas ocasiones.

*"(...) if you choose to let space come in there, or let it go out. Instead of post-and-beam construction, the usual box building, you now have a new sense of building construction by way of the cantilever and continuity.... this simple change of thought lies the essential of the architectural change from box to free plan and the new reality than is space instead of matter."* Frank Lloyd Wright

---

## 2.2. Antecedentes.

*"...among the pine trees, breathing fresh air and sunlight"* Frank Lloyd Wright

---

Desde un primer momento, desde los primeros garabatos realizados por el propio Wright encima del boceto primario para la sede de Johnson Wax, vemos cómo éste ya tenía muy claras las ideas para la realización del edificio, en cuanto a lo formal y a lo poético, queriendo juntar en el mismo edificio lo público y la naturaleza virgen.

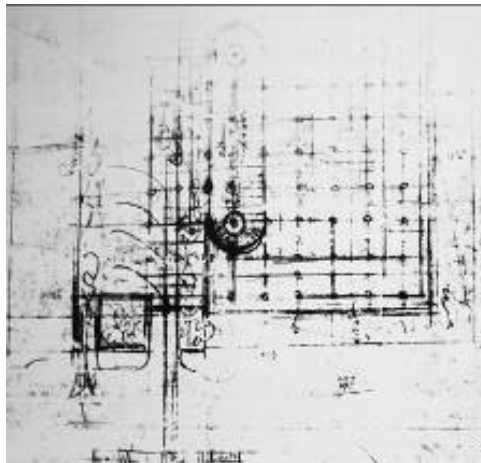


Figura 27. Boceto conceptual realizado por F.L.Wright de la sala de trabajo del edificio Johnson Wax

Indagando en los orígenes formales del edificio, no nos cuesta demasiado llegar a sus antecesores, los cuales no son otros que dos diseños para oficinas anteriores del propio Wright, uno construido, el edificio de administración Larking y otro que no se llegó a construir, un proyecto para el edificio de oficinas del Capital Journal.

El edificio de administración Larking fue diseñado en 1903 para la fábrica de jabones Larking en Buffalo, Nueva York, para él ya se utilizaron muchos de los principios que seguirá el que nos atañe;

como la inclusión de aire acondicionado, diseño de mobiliario propio, la utilización de luz cenital o el autocerramiento hacia el interior.

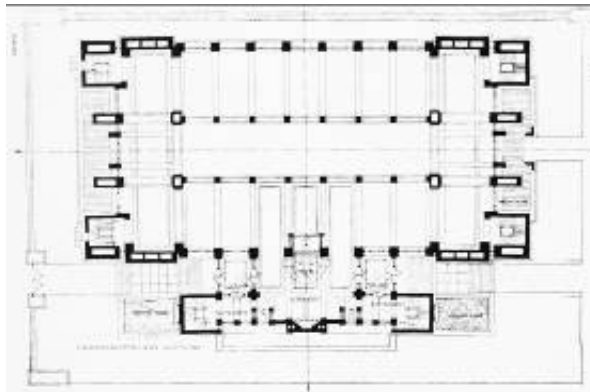


Figura 28. Planta Larkin Building, 1908

En el proyecto del Capital Journal, aparecen por primera vez, las famosas columnas utilizadas por Wright en el Johnson Wax.

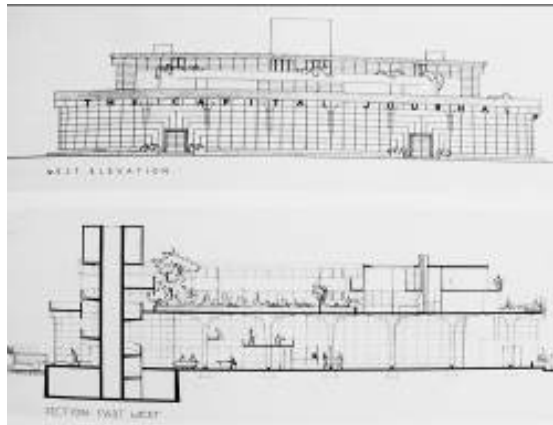


Figura 29. Alzado este y sección del proyecto para le Capital Journal

Si estudiamos un poco las plantas de los edificios citados, encontramos varios aspectos formales y constructivos utilizados en estos por separado, que en conjunto van a ayudar a la creación de uno de los más famosos edificios del ya citado arquitecto.

- Del proyecto del Capital Journal podemos extraer los siguientes elementos:

Las columnas, utilizando la misma rejilla de columnas de veinte pies, 6,1 metros aproximadamente, conocidas como "mushrooms columns" debido a su forma cónica que se estrecha en la parte baja y va ensanchando en altura. Estas ocupan, al igual que en el edificio estudiado, una gran sala de trabajo y ayudan a sujetar una planta en forma de "U" superior de oficinas, idea que también vemos en el edificio Johnson.

Otra característica común a ambos proyectos es la manera de circulación. Ya que utiliza torres de escaleras circulares para realizar las conexiones entre las distintas plantas.

Por último, de éste proyecto no construido, se añaden también las líneas curvas y bajas, más suaves y orgánicas que las que veremos a continuación. Reforzando la idea de Wright de organicismo.

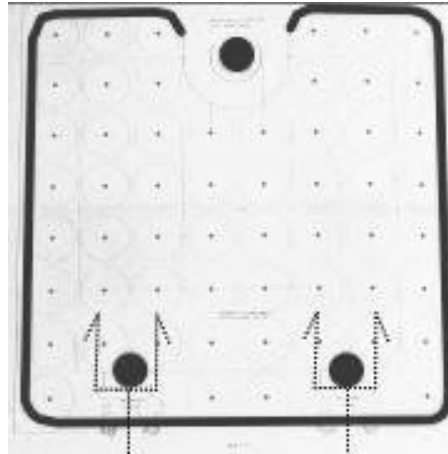


Figura 30. Esquema compositivo y recorrido sobre planta del proyecto del Capital Journal

- Del edificio de administración de la compañía Larking podemos ver las siguientes comparaciones:

Principalmente, a parte de la gran sala de trabajo abierta, con espacio de oficinas a doble altura, de éste hay que destacar el espacio auxiliar de circulación que conforma el aparcamiento techado. Separado de la sala de trabajo y que pone de nuevo de manifiesto la idea de Broadacre city de Frank Lloyd Wright.

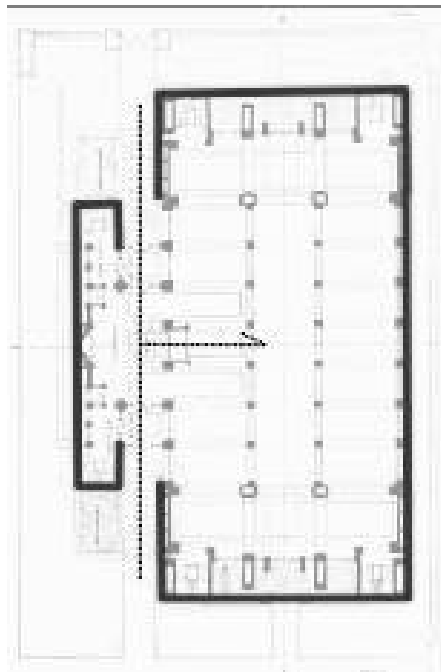


Figura 31. Esquema compositivo y recorridos sobre planta edificio Larkin

En contraposición con el anterior, de éste se incluye la verticalidad y la angularidad de la que carece el proyecto del Capital Journal lo que crea una mezcla perfecta de ambos.

### 2.3. Edificio de administración de la Johnson Wax

A partir de los citados conceptos acaparados de sus anteriores proyectos, se empieza a vislumbrar una idea clara en la formación de éste nuevo edificio. Cabe, a mayores, citar varias características además de exponer su distribución de una forma clara para tener una comprensión total de éste.

La idea central, nombrada anteriormente en algunos puntos, es la destrucción de la caja, idea que tenemos que tener muy en cuenta para entender determinados detalles de la composición formal.

Partamos de juntar los dos esquemas adjuntados anteriormente, lo que nos dará una primera idea de lo que va a ser la planta del edificio.

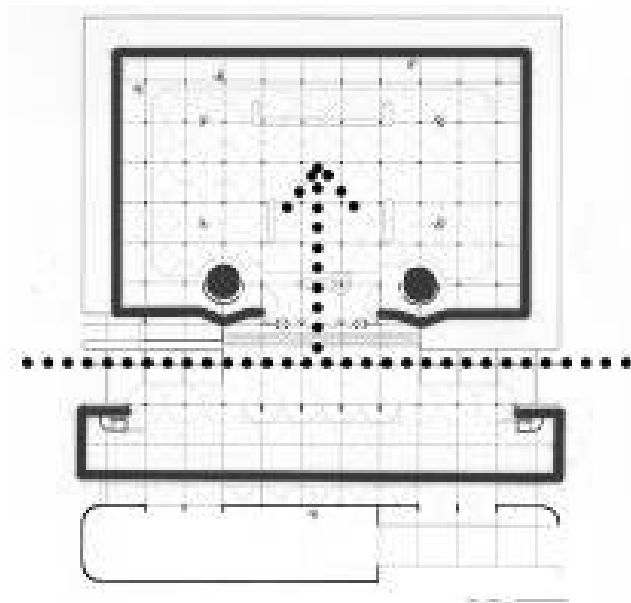


Figura 32. Esquema conjunto sobre planta del edificio Johnson Wax

Compositivamente, como hemos dicho, se crea una retícula de columnas 10x6 columnas. Las dimensiones de la planta se basan también en la rejilla de pilares de veinte pies y en divisiones de 4 o 5 pies, 1,5 metros.

Rodeando todo este entramado de "mushrooms columns" se crea una planta intermedia de oficinas. Para romper la caja, en vez de llegar con las columnas al borde como en los edificios tradicionales, se crea un voladizo de 3 pies, un metro aproximadamente. Convirtiendo así a los muros de ladrillo en mero cerramiento, en algo independiente, sin una función estructural principal como la de las columnas. Permitiendo así romper las esquinas creando en ellas entrantes de luz hacia el interior del edificio desde puntos donde se ubicaría la esquina tradicional, ganando un gran efecto de libertad hacia ese principio de espacio por el que Wright ha luchado en su evolución como arquitecto.

Pero no solo rompe la caja en las esquinas sino también en el plano de techo, en la parte central de la gran sala por encima de las columnas, lo que será una de los puntos característicos del proyecto que veremos más adelante consiguiendo la entrada de luz cenital.

"Just take care of the terminals, and the rest of the building will take care of itself" Louis Sullivan

Por esto, el estilo "streamlining" de Wright, ese ímpetu de dinamizar los espacios, se hace más profundo en el edificio Johnson, con éstos detalles horizontales que representan una completa integración de la estructura.

Con sistemas de luz natural y artificial, haciendo un gran esfuerzo para hacer que el espacio fluya, dato que queda remarcado en el material de cerramiento exterior, que aparece en el interior igualmente continuando esa fluencia citada. También se comprueba en la introducción de la luz artificial en los puntos donde entra la natural, consiguiendo que la luz fuera lo más parecida posible de día y de noche.

"That's part of what he called being a thoroughbred. If a building was brick, it was entirely brick" Howe

Así mismo, ya citado anteriormente, la idea de Broadacre City se incluye en numerosos detalles de la composición del edificio, reflejado por ejemplo en la inclusión del parking en el todo del edificio, celebrando así la inclusión del coche.

En lo relativo a la distribución: Primeramente, hablando en planta, como hemos dicho, el edificio se conforma por la unión de los dos esquemas anteriormente citados. Creando en planta primera, un gran espacio que será la sala de trabajo, a doble altura, anillado superiormente por una media altura de oficinas. Seguidamente, aparece el hall a triple altura que separa lo cerrado de la siguiente parte hacia la derecha que es el aparcamiento cubierto ya citado en el esquema del edificio Larking.

Siguiendo ya en sección, directamente encima del aparcamiento, se encuentra un teatro y comedor rediseñado por Wright que parte de él vuelca hacia la triple altura del hall. De igual manera, "flotando" alrededor de la sala de trabajo se sitúa la zona de oficinas a media altura.

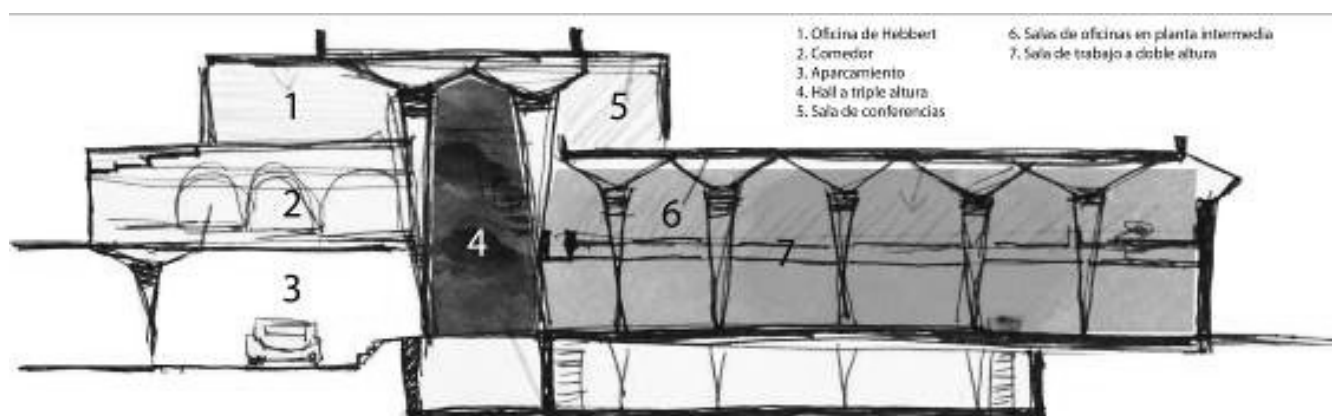


Figura 33. Sección esquemática distribución y espacios

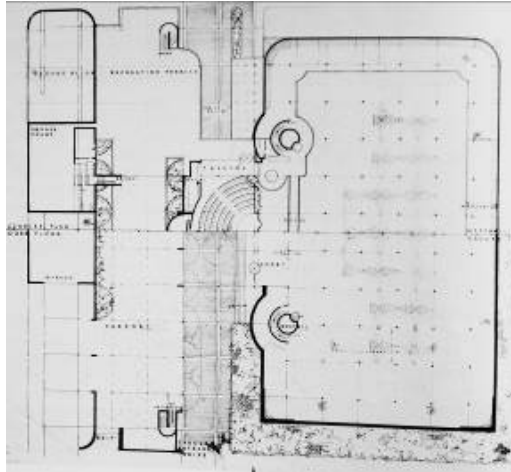


Figura 34. Planta de acceso y planta intermedia sobre sala de trabajo.

Por último, en la última planta, singular a simple vista del edificio por sus dos lóbulos simétricos, se sitúa, de izquierda a derecha, la oficina de Johnson, en la zona central una sala de conferencias y en la zona simétrica de los lóbulos, zona de oficinas para los ejecutivos de la compañía, separadas en dos divisiones, operaciones y publicidad.

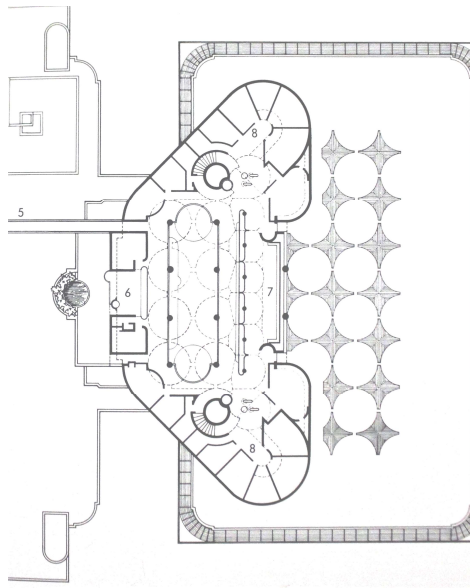


Figura 35. Planta tercera del edificio Johnson Wax

#### 2.4. Elementos característicos, las columnas y la rotura de las esquinas.

Varios son los elementos representativos de éste proyecto, los cuales merecen tener su apartado propio por su complejidad y riqueza en cuanto a concepto y avances constructivos.

- El primer elemento que Wright mejoró respecto de sus anteriores proyectos fueron los muros perimetrales, sin función estructural principal.

Estos estaban formados por dos filas de ladrillos especiales, diseñados por el propio Wright para cuadrar con las alturas del edificio, separados unos 20 cm entre ellas. Entre medias introdujo unos 7,6 cm de tablero de aislamiento de corcho y los huecos que quedaban entre el tablero de corcho y las filas de ladrillos se rellenan con un armado de barras de acero y hormigón.

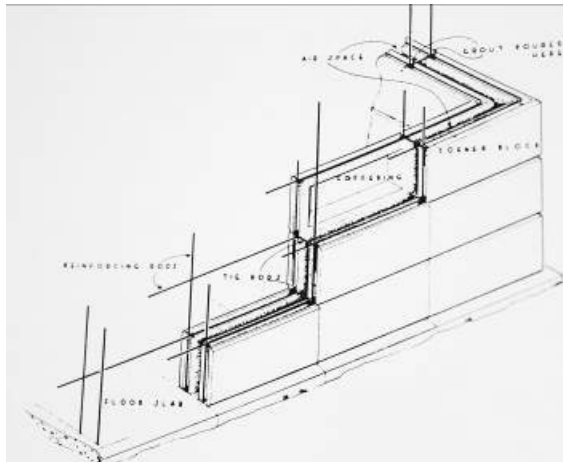


Figura 36. Axonométrica tipo muro cerramiento perimetral.

- Las columnas "dendríform":

El suceso más llamativo relacionado con la construcción de las columnas y que nos puede ayudar como introducción tuvo lugar cuando debido a los códigos estatales, en cuanto a las estrecheces de las columnas en la zona de su base, no permitían la construcción de éstas por el peligro de que no aguantaran.

Wright intentó explicar de varias maneras cómo su diseño era mejor y capaz de aguantar un mayor peso, incluso explicó de dónde sacó la inspiración de éste diseño, que no fue otro que de la manera de llevar las bandejas los camareros con una sola mano abriendo la palma.

Finalmente parece que convenció a la administración y le dejaron comenzar siempre que realizara una prueba de carga con una de sus columnas, debiendo ésta aguantar 12 toneladas. Acto que tuvo lugar durante el mes de junio, el 4. Una vez el hormigón hubiese endurecido y curado y se pudiesen retirar todos los encofrados de la columna de prueba, arriestrándola mediante cuatro vigas de madera cruzadas evitando así el vuelco.



Figura 37. Imagen de la realización de la prueba de carga

La columna se fue cargando con sacos de arena en tu parte alta. Cuando se alcanzaron las 12 toneladas la administración se quedó satisfecha pero el propio Wright, dolido porque la adminis-

tración le hubiera obligado a realizar el test sin confiar en sus cálculos, dijo que se siguiera cargando la columna incluso con metal en vez de arena. Ya por la tarde la columna estaba aguantando la friolera de 60 toneladas y solo tenía pequeñas fisuras en la parte superior. En éste momento el propio Wright se sintió satisfecho e hizo derribar la columna. Obviamente después de esta prueba la administración permitió la construcción de las columnas.

El término utilizado por Wright para éstas columnas fue el de "dendriform", con forma de árbol. Acuñado debido a la intensidad con que Wright quería siempre relacionar sus proyectos con la naturaleza, de vuelta al organicismo citado, siendo en éste caso las columnas los troncos de los árboles que se verían si el edificio se hubiera localizado en la naturaleza.

Las columnas se dividen en 3 fragmentos que las conforman teniendo estos también nombres relacionados con la naturaleza:

1. "Stem" o "tallo", es la primera parte de las tres, situado directamente sobre la base, con aproximadamente unos 23 cm de ancho en la parte baja y ensanchándose unos 6,3 cm desde el eje vertical según vamos subiendo en altura. Según la referencia del camarero llevando una bandeja, ésta parte sería la muñeca del camarero.
2. "Calyx" o cáliz, esta parte es un continuo a la anterior o tallo, situado en su parte superior y con una anchura superior a la anterior hueco y de manera anillada. Sería la mano del camarero.
3. "Petal" o pétalo, sobre el cáliz se sitúa una plataforma de aproximadamente 32 cm de grosor hueca en su interior, al igual que las anteriores, con dos anillos de hormigón interiores que unen las ménsulas de hormigón que se encargan de dar la resistencia necesaria al elemento evitando su rotura.

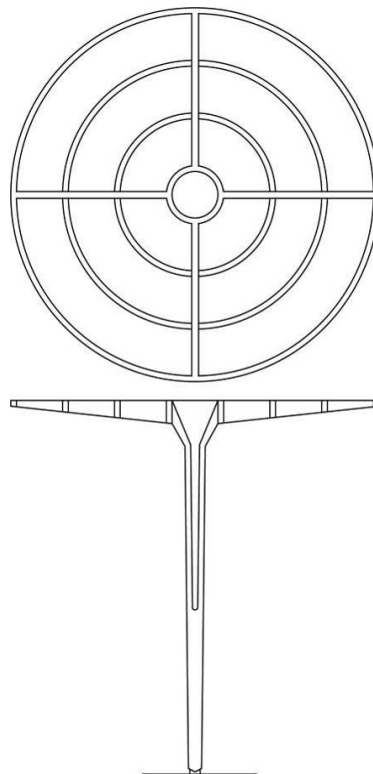


Figura 38. Planta y sección de una columna cortada para ver la formación del Petal.



Las dos primeras partes de la columna, vamos a citarlas con sus nombres originales, Stem y Calyx, están reforzados con una malla de acero. Y la parte superior, Petal, tiene, a mayores de la malla redondos de acero.

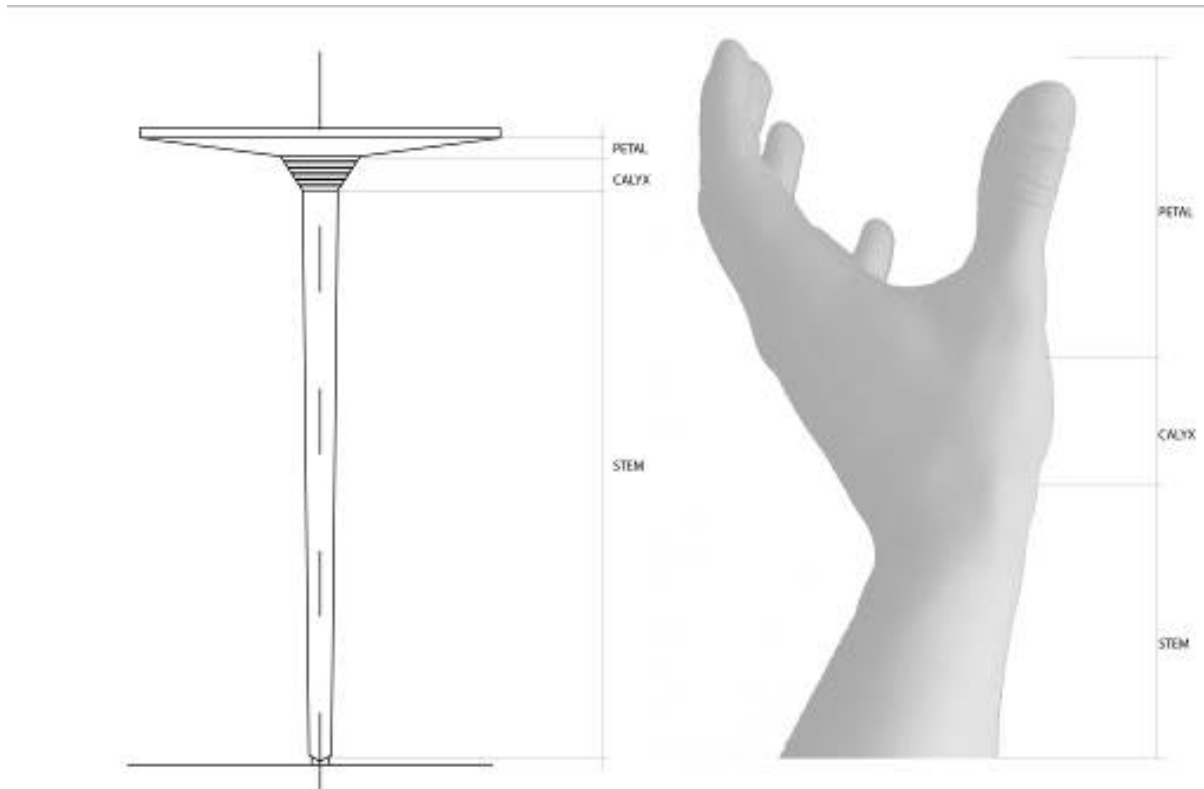


Figura 39. Esquema comparativo entre columna y mano de un camarero.

Cabe añadir dos partes a la formación de la columna, que son la base de unos 18 cm y, haciendo tope o cerrando las partes huecas por las que está conformada, se sitúa una losa circular de igual diámetro que el Petal situado justo debajo de ella.

Cada losa circular está interconectada con las adyacentes con unas pequeñas vigas lo que hace que todo funcione como un conjunto unido apoyado en una red de soportes.

Dependiendo del lugar que ocupen dentro del proyecto deben tener una altura y un tamaño del espacio hueco. Por lo que aparecen tres tipos de columnas en éste proyecto, las que sujetan toda la parte del aparcamiento techado, más bajas y con un Calyx de mayor tamaño que el Stem; las situadas en la parte del hall a triple altura, que son las más altas de 9 metros y poseen un hueco interno de dimensiones menores a las terceras; El tercer tipo de columnas son las situadas en la gran sala de trabajo, que son algo menores que las anteriores, midiendo éstas 6,4 metros, y con un hueco interior de dimensiones mayores.

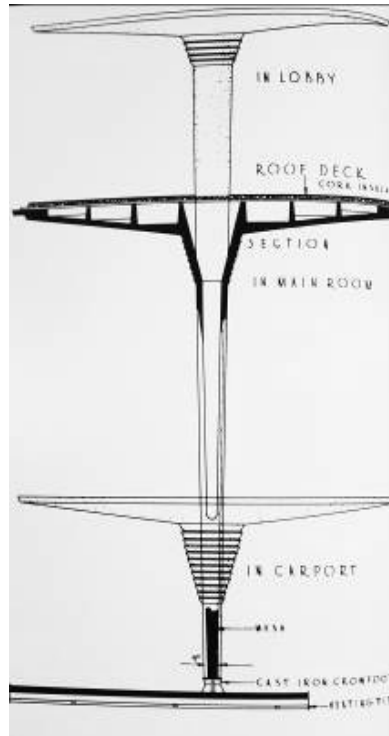


Figura 40. Esquema de los tres tipos de columnas superpuestas.

Ésta idea de hacer parcialmente hueca la parte del Stem y hueco el Calyx y el Petal dejando que se sujeten por unas paredes tan finas que casi conviertes a éste tipo de columna es estructuras del tipo cáscara. Teniendo en cuenta que éstas columnas fueron diseñado mucho antes de que el término estructura de cáscara existiera por lo que se convierten en predecesores de todas estas estructuras. Siendo también mucho más estructuralmente eficientes que los ejemplos que pudieran servir como antecedentes a las creadas por el propio Wright.

*"Form does not follow function. Rather, form and function are one" Frank Lloyd Wright*

---

- La ruptura de las esquinas:

Como ya se ha dicho en otras ocasiones, un fin a lo largo de la carrera de Frank Lloyd Wright fue la ruptura de la caja en cuanto a concepto de proyecto. Consiguiendo de ésta manera la continuidad de espacio entre el interior y el exterior o naturaleza sabiendo que cerrarse entre paredes era una manera de cohibir a las personas.

*"In the Johnson building you catch no sense of enclosure at any angle, top or sides. You are looking at the sky and feel the freedom of space" Frank Lloyd Wright*

---

Por éste hecho, Wright quiso "romper" todas las esquinas del edificio y "cerrarlas" con vidrio. El primer requisito en el que insistió fue en que los vidrios no fueran planos y de cristal, ya que no quería que se pudieran ver los alrededores los cuales no tenían para Wright ningún interés, todo derivado de su intención de haber movido el edificio a la naturaleza.

Él quería que los cerramientos fueran translúcidos, en ángulo para que la entrada de luz fuera más irregular y no creara problemas y que fueran curvos, ya que los bordes de los muros creados por Wright eran así. Por último, debían componerse de capas horizontales. Ya sabemos que Wright sentía un importante vínculo con la línea horizontal, la cual según él representaba no solo la horizontalidad del edificio sino que también enfatizaba con la Tierra y por consiguiente con el organicismo.

La esquina quedaba formada por unas claraboyas alrededor de todo el edificio que separaba la pared del edificio. A mayores, existía una claraboya inferior en la zona de la planta intermedia que separaba ésta de la pared existente justo debajo. Por último, la parte que falta de remarcar es el techo propio de la gran sala de trabajo, que también quedaba expuesto a la entrada de luz exterior mediante el mismo cerramiento que lo anterior.

Para la realización de éste detalle, se probaron muchas opciones y se investigaron con ellas. Primeramente iba a ser una forma lineal quebrada en la esquina formada por piezas más pequeñas pero más o menos ortogonales. Ésta opción como otras muchas se descartó por la imposibilidad de la creación de las piezas por las compañías de vidrio a las que acudió Wright.

Finalmente, una empresa, Pyrex, que anteriormente se había dedicado a la creación de probetas y tubos de ensayo, decidió investigar en éste detalle utilizando para ello tubos de plástico que podían ser curvos en las esquinas tal y como deseaba Wright.



Figura 41. Imagen interior del detalle final de la claraboya con la introducción de la luz artificial.

Para la configuración final del detalle de la doble piel de tubos, Wright diseñó una especie de estantes de aluminio que junto con abrazaderas unían los tubos en su interior. Las juntas horizontales se sellaban con masilla, la cual también fue fuertemente investigada para utilizar la correcta, una hecha con Vulcanita. Y encima de la masilla se insertarían tubos más pequeños sellando definitivamente éstas.

El último detalle que quedaba sin rematar era el de la luz artificial, que en un principio Wright quería que fuesen lámparas de mesa, cosa totalmente revocada por la compañía. Así, Wright introdujo las lámparas de luz artificial entre las dos capas de tubos de las claraboyas, proporcionando una luz artificial muy similar a la natural proyectada por la luz del sol.

### 3. ANÁLISIS

#### 3.1. Introducción

En el siguiente apartado se quiere realizar una crítica organizada sobre el edificio de la Johnson Wax. Para llevar esto a cabo, se va a dividir el análisis en tres apartados con el fin de que quede lo más simplificado en cuanto a puntos a tratar.

El primer punto será el análisis o crítica compositiva donde se pondrán de manifiesto los apartados relacionados con la idea de proyecto desde un punto de vista de la crítica de la arquitectura como se ha expuesto en el punto 3 del apartado II Estado del Arte del presente trabajo. De esta forma criticaremos las soluciones obtenidas poniéndolas en entredicho con respecto a otras que se puedan imaginar de manera coherente, explicando los cambios compositivos que puedan acarrear dichas soluciones alternativas.

Como segundo punto, nos centraremos más en un análisis estructural, del mismo modo que el anterior, comparando la solución utilizada por Frank Lloyd Wright con otras opciones reales que se podrían haber dado. Analizaremos los diferentes resultados con la intención de alcanzar un razonamiento del por qué de la elección de dicha solución final.

Por último, y como tercer punto vinculado al segundo, se realizaran cálculos de las soluciones reales y de las aportadas para además de tener análisis teóricos tener una base matemática que respalde dichos resultados desde el punto de vista económico y de la cantidad de estructura utilizada en los casos en los que sea posible debido al tamaño del presente trabajo.

#### 3.2. Análisis compositivo

De la misma forma que se han citado los conceptos de manera genérica en el punto 3 del apartado II, se van a tratar a continuación esos conceptos pero refiriéndonos exclusivamente al edificio en cuestión que queremos tratar en el presente trabajo: El edificio de administración de la Johnson Wax.

##### (a) La materialidad y la destrucción de la caja:

Primeramente nos centraremos en la materialidad en el proyecto de Frank Lloyd Wright. En el cual solo se utiliza el ladrillo para la creación de los muros verticales y el vidrio o plástico para los puntos de conexión en las esquinas y en la parte cenital de la gran sala de trabajo.

Llegados a éste punto, vemos como un material pesado, que tradicionalmente está ligado a la sustentación como es el ladrillo, en nuestro proyecto a tratar, se utiliza para la composición de las fachadas en los muros perimetrales. Los cuales no poseen una función estructural primaria, sino que se utilizan simplemente como cerramiento separador del espacio interior con el exterior y como método de composición de las alturas de dicho edificio, ya que se modula en parte a las medidas de los ladrillos especiales diseñados por el propio Wright.

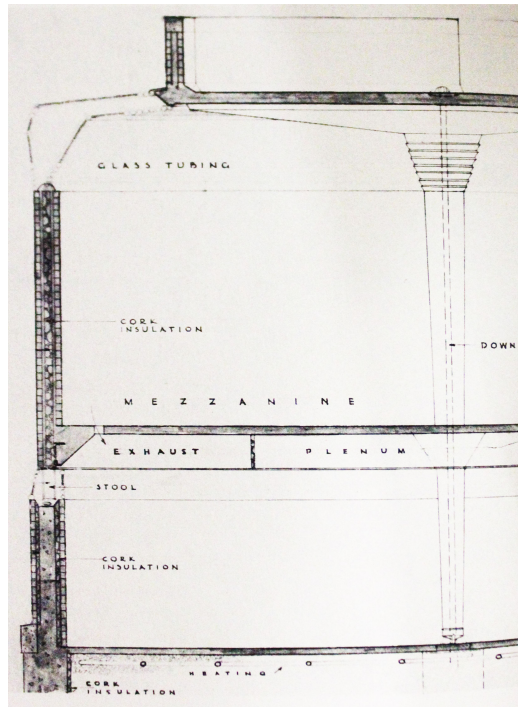


Figura 42. Esquina de vidrio con muro no portante.

Dando un vistazo al edificio podemos pensar que los muros son de carga ya que dan la impresión de fuerza de rigidez. Pero si observamos un poco más inquisitivamente, vemos como todas las esquinas horizontales están "rotas" definiendo de ésta manera que lo que soporta los forjados no son los muros sino una estructura interior que libera mediante un pequeño voladizo las esquinas.

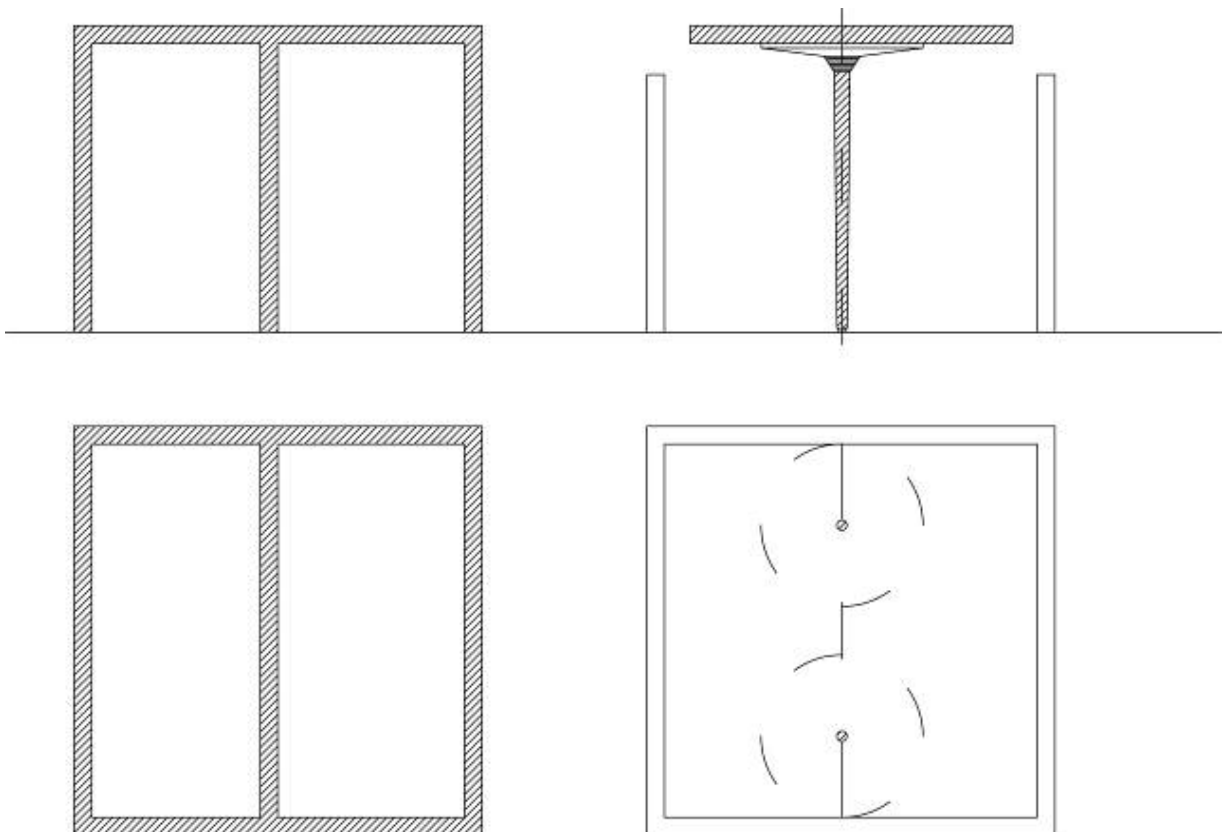


Figura 43. Esquemas de materialidad tradicional de muros de ladrillo frente a la utilizada en el proyecto de Wright.

Queda así explicado que el primer material tratado, el ladrillo, se utiliza de una forma desmaterializada del mismo, atribuyéndole propiedades que no son las tradicionales o propias de dicho material.

El uso del vidrio, en éste caso de los tubos, en cambio, se utiliza según el significado propio de la tipología de éste material. Las funciones que tiene en el proyecto son dos, la primera es romper la esquina permitiendo la entrada de luz, creando un vacío en el punto donde originariamente habría sólido. La segunda es permitir la entrada de luz por le plano horizontal superior del techo creando otro vacío donde también debería de haber sólido.

Pero en éstos casos las características atribuidas a los tubos son las mismas que las del vidrio, funcionando como creadores de vacíos de huecos, con efecto inmediato de ligereza donde un sólido genera fuerza.

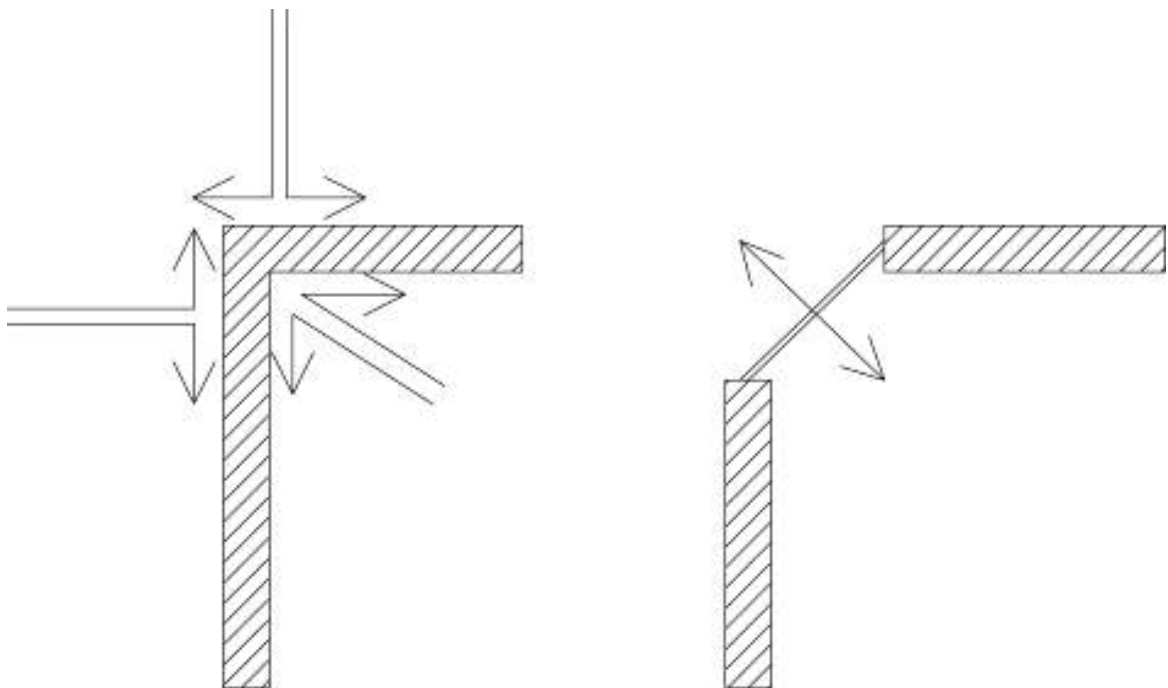


Figura 44. Esquema de esquina tradicional y esquina con hueco.

Todas éstas técnicas utilizadas en cuanto a la materialidad de los elementos constructivos fue utilizada por Wright con el fin principal de la destrucción de la caja. Idea que ha perseguido a lo largo de su carrera.

Aquí el demostrar esa idea, en mi opinión, se fuerza. Creando una caja de ladrillo con apariencia de pesadez, de sólido macizo, y creando en esta caja roturas horizontales a lo largo de todas sus esquinas. Consiguiendo de éste modo que desde el interior, la percepción de caja que se puede ver en el exterior, desapareciera en su totalidad apreciando incluso ligereza.

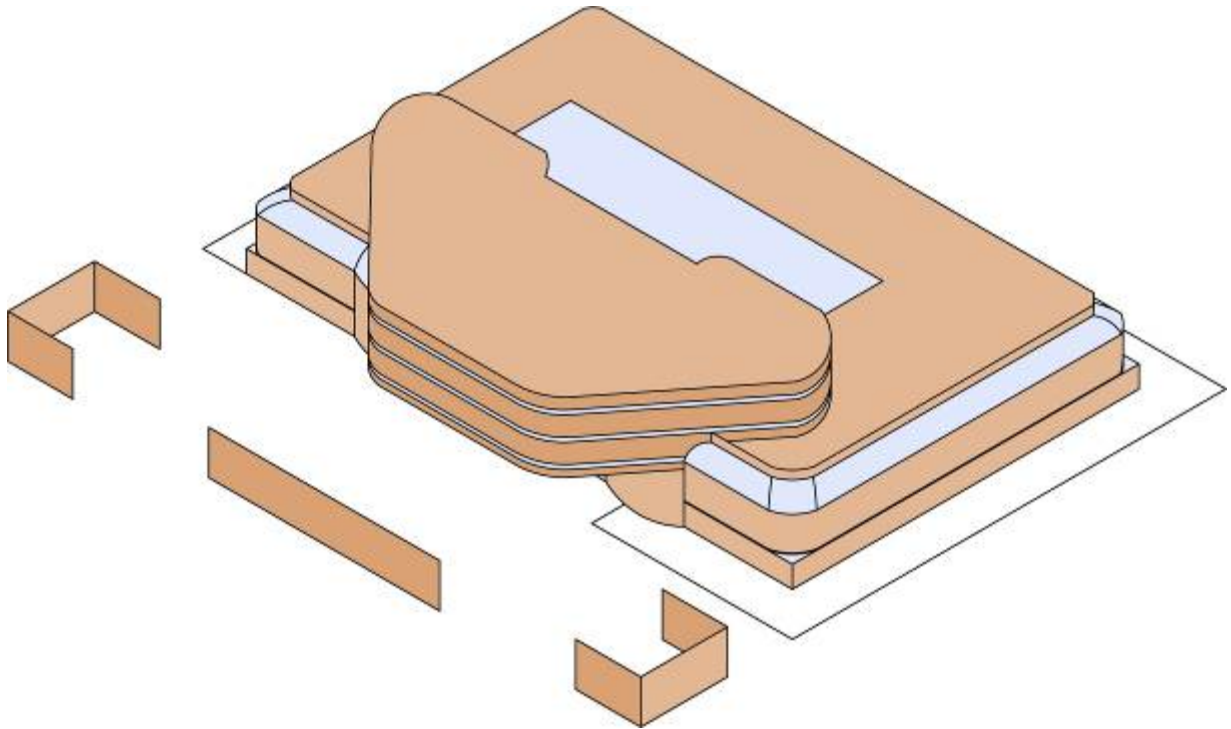


Figura 45. Esquema de rotura de la caja de ladrillo

### (b) Aditivo o unidad:

Estos conceptos se pueden asumir desde dos puntos de vista. El de la estructura o el de la composición del edificio.

En cuanto a la estructura de nuestro edificio consta de tres elementos diferentes como son las columnas del aparcamiento, las del hall y las de la gran sala de trabajo. Llegados a éste punto podríamos pensar, por lo tanto, que es un edificio aditivo. Pero la realidad es que estos tres elementos forman uno solamente que son las mushrooms columns, diferenciándose básicamente en el tamaño pero formando por lo tanto una unidad estructural para la creación de la totalidad del proyecto.

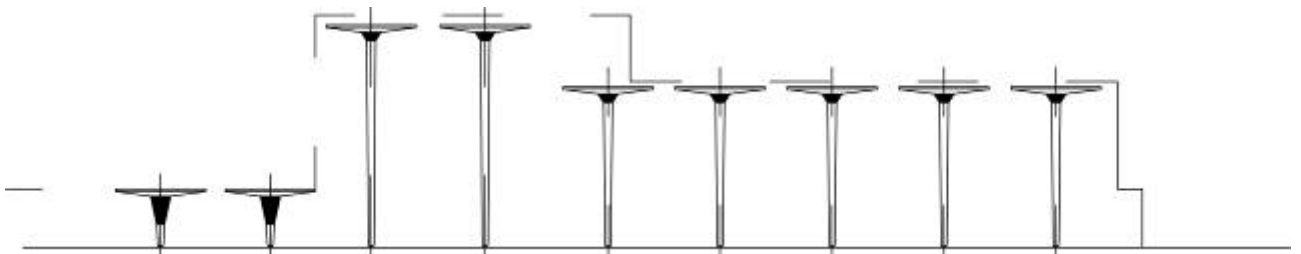


Figura 46. Esquema formación del proyecto mediante la unidad de columnas.

La segunda parte a estudiar es la compositiva. A simple vista, observamos una primera forma predominante como es al volumen rectangular que da cabida a la gran sala de trabajo. A esta forma se le acoplan otras dos formas rectangulares de manera paralela y superiormente la forma



que más discordia puede llegar a causar, que sería la adhesión de los lóbulos superiores en ángulo.

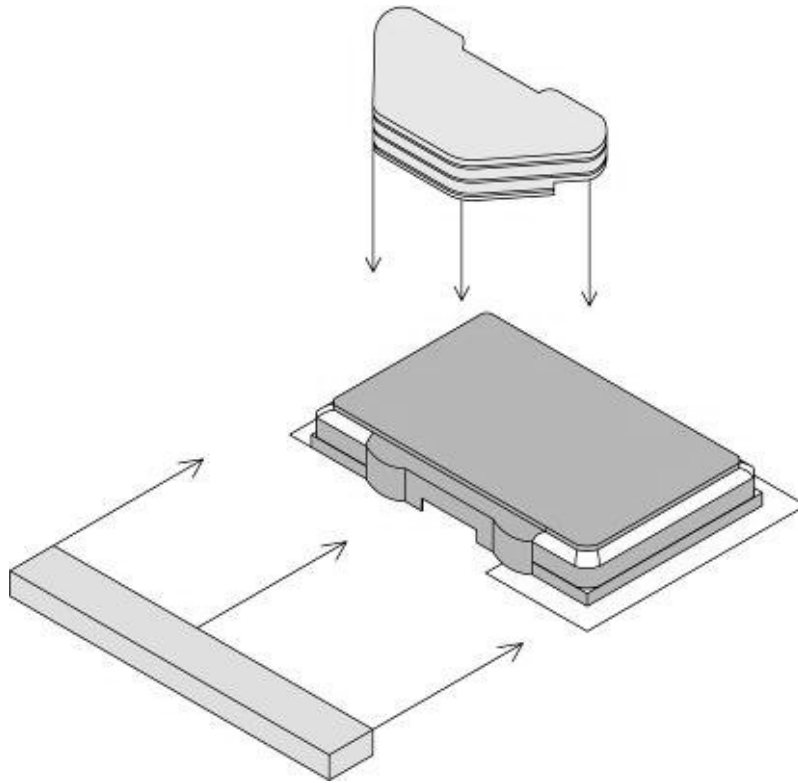


Figura 47. Esquema adhesión de los diferentes volúmenes.

Visto así, se podría decir que el proyecto, hasta donde le estamos contando puede tratarse de una adición, también por la existencia de un elemento puente que une los lóbulos superiores con los elementos al otro lado del aparcamiento.

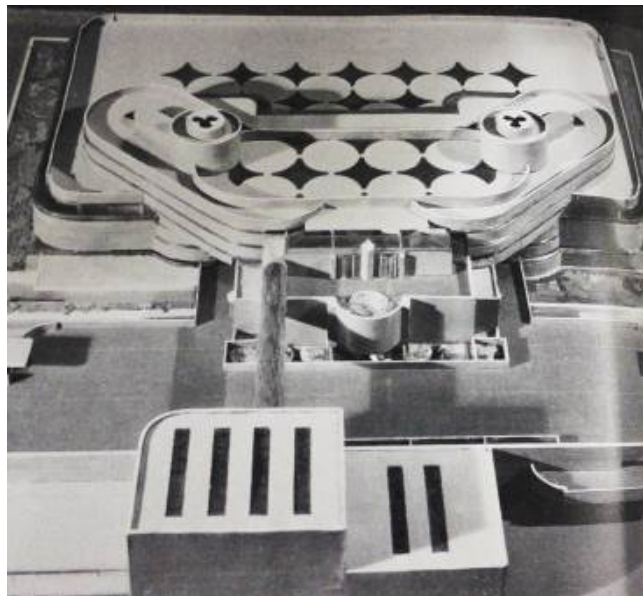


Figura 48. Foto maqueta

Podría ser una opción en cuanto a la crítica, pero en mi opinión, si observamos un alzado total del edificio, incluido el elemento puente vemos que no hay otra manera de entender éste proyecto que el de unidad compositiva, de la misma forma que la estructura.

La delicadez con la que se conforma el edificio, creando dos tipos de bandas a lo largo de todo el proyecto, que son las horizontales del ladrillo, aportan organicismo en sus esquinas y conexión; y las "roturas" producidas por los tubos de vidrio en las partes superiores, formando un ritmo entre ladrillo y hueco, hacen que no haya otra forma de leer éste edificio que el de unidad total.

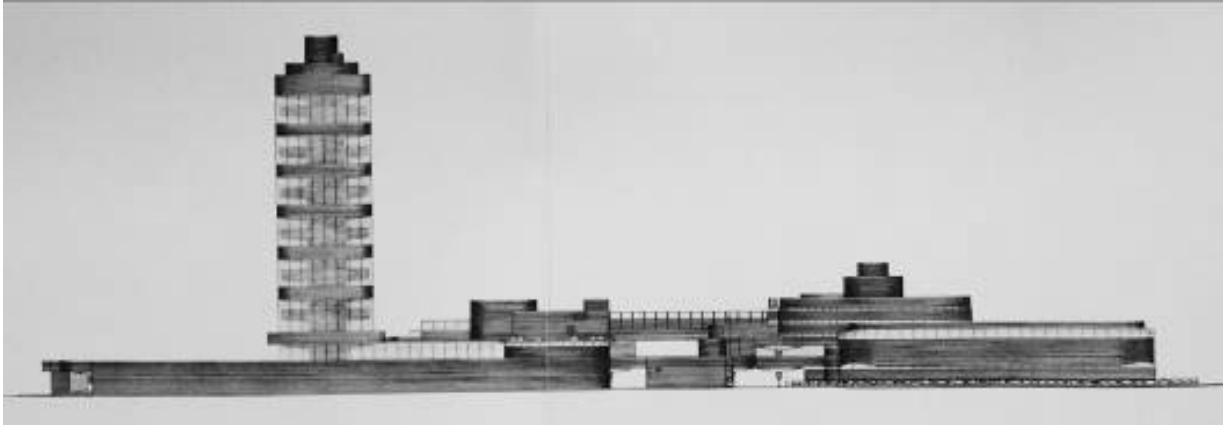


Figura 49. Alzado proyecto finalizado.

El zócalo que se crea con la banda primera de ladrillo también unifica y hace que desde un primer momento se tenga que ver como unidad, permitiéndose una disgregación algo mayor en las partes superiores con las terminaciones a diferentes alturas de partes de sus elementos.

### (c) Espacio y vacío creador:

El concepto de espacio u objeto como se ha citado anteriormente puede ser algo muy subjetivo dependiente de los ojos de quien mire o analice el proyecto.

En éste caso, queda algo más delimitado, cuando ha sido el propio autor de la obra el que ha definidos sus intenciones en cuanto a la función del espacio y del objeto de su obra.

La luz parece ser el por qué de la creación de la gran sala de trabajo. ([FRANK LLOYD WRIGHT AND THE JOHNSON WAX BUILDINGS, JONATHAN LIPMAN](#)).

Partiendo de ésta base, debemos entender el proyecto de Wright, sus envolventes, más que como un contenedor, que obviamente lo es, como una necesidad. Una necesidad tecnológica a la hora de hacer un proyecto de una sala de trabajo, pero que en realidad quiere convertir la naturaleza y el espacio exterior en el mismo que el interior.

Para ello volvemos a la importancia que plantea la rotura de paramentos tradicionalmente sólidos, permitiendo que ese exterior se introduzca en el espacio aislado por la envolvente. Otra pista que nos da el arquitecto es la creación de las famosas "mushrooms columns" que su intención creativa no es otra que la de introducir un bosque exterior en una zona de trabajo cerrada.

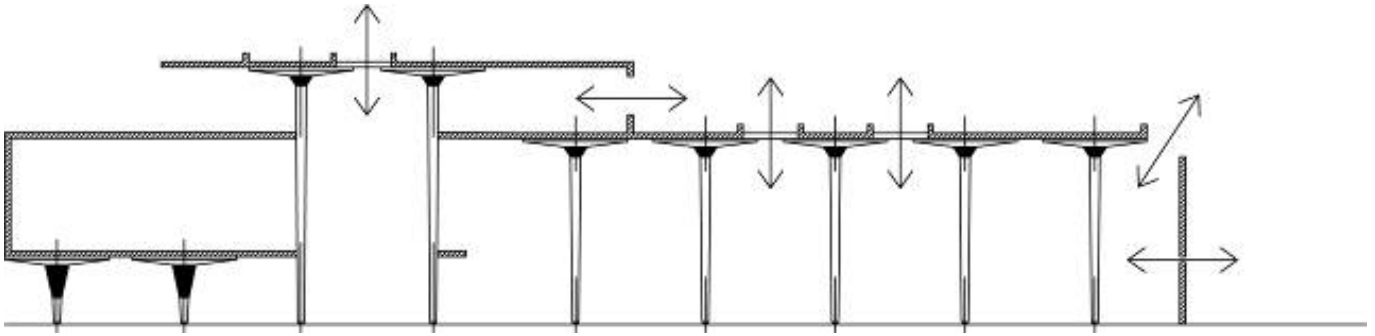


Figura 50. Esquema en sección de como el espacio interior y exterior se convierte en uno solo.

De ésta manera, Wright consigue dos cosas que buscaba desde el inicio. Una, aislar la visión de los alrededores industriales existentes en el lugar de realización del proyecto; dos, la comunicación del edificio entre el interior y el exterior haciendo todo uno y no creando "objetos" o contenedores de espacios, sino espacios que fluyen libremente.

Un aspecto relacionado con lo anterior es el de vacío como creador de arquitectura o como "residuo" creado por la arquitectura.

En éste proyecto, existen dos grandes espacios a tener en cuenta dentro del edificio de administración. Primeramente el gran espacio de dos alturas de sala de trabajo; y segundo, el gran hall a triple altura.

Ahora hay que analizar si éstos son consecuencia de las partes del proyecto o si en cambio, se crean los espacios y a partir de estos se van generando las demás partes del proyecto.

El primero, el de la sala de trabajo, se trata de un vacío creador, ya que desde el principio lo que se buscaba para la creación de la Johnson Wax, era un espacio de trabajo. Luego alrededor de éste espacio importante, ha crecido la media altura volcada al mismo y se ha permitido la comunicación entre éste y el espacio exterior. De nuevo vemos como todo gira en torno al vacío de la sala de trabajo que va desarrollando otros ambientes a partir de él.

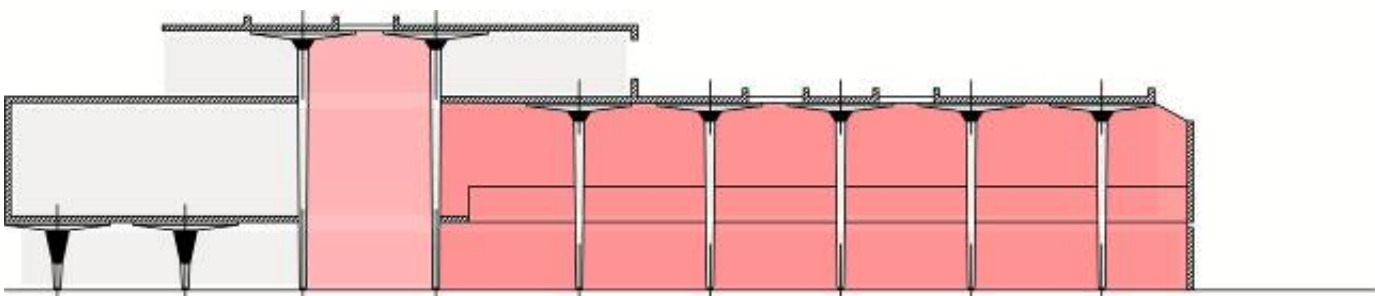


Figura 51. Esquema entre vacíos

En cambio el vacío del hall, en mi opinión es un vacío creado, precisamente a partir del vacío principal que es el citado anteriormente de la sala de trabajo. Por lo que la triple altura del hall es un vacío a medio camino entre creado por la arquitectura y vacío creador. Definámosle como vacío creado por la existencia de otro vacío de mayor importancia.

**(d) Diagramas:**

Este es el último apartado de ésta parte, empezando a tratar ya la estructura desde un punto de vista más objetivo dejando en un segundo plano lo compositivo tratado anteriormente. De ésta forma éste punto se sitúa a medio camino entre lo compositivo y lo que viene posteriormente que debe ser el análisis de conceptos de una manera más técnica.

No todos los edificios que se quieran analizar poseen un diagrama de los que se han tratado en anteriores puntos u otros que por extensión no se hayan descrito. Sino que el hecho es que la mayoría de los proyectos tienen puntos que tendrán que ver con alguno de éstos diagramas o no de manera totalmente diferenciada.

A continuación, vamos a analizar la colocación de la estructura en nuestro edificio, remarcando que puntos pueden estar en contacto con alguno de los diagramas citados, así como la utilización o no de la cuadrícula cartesiana y como ésta influye en la creación de las estancias y los espacios del propio diseño de Wright.

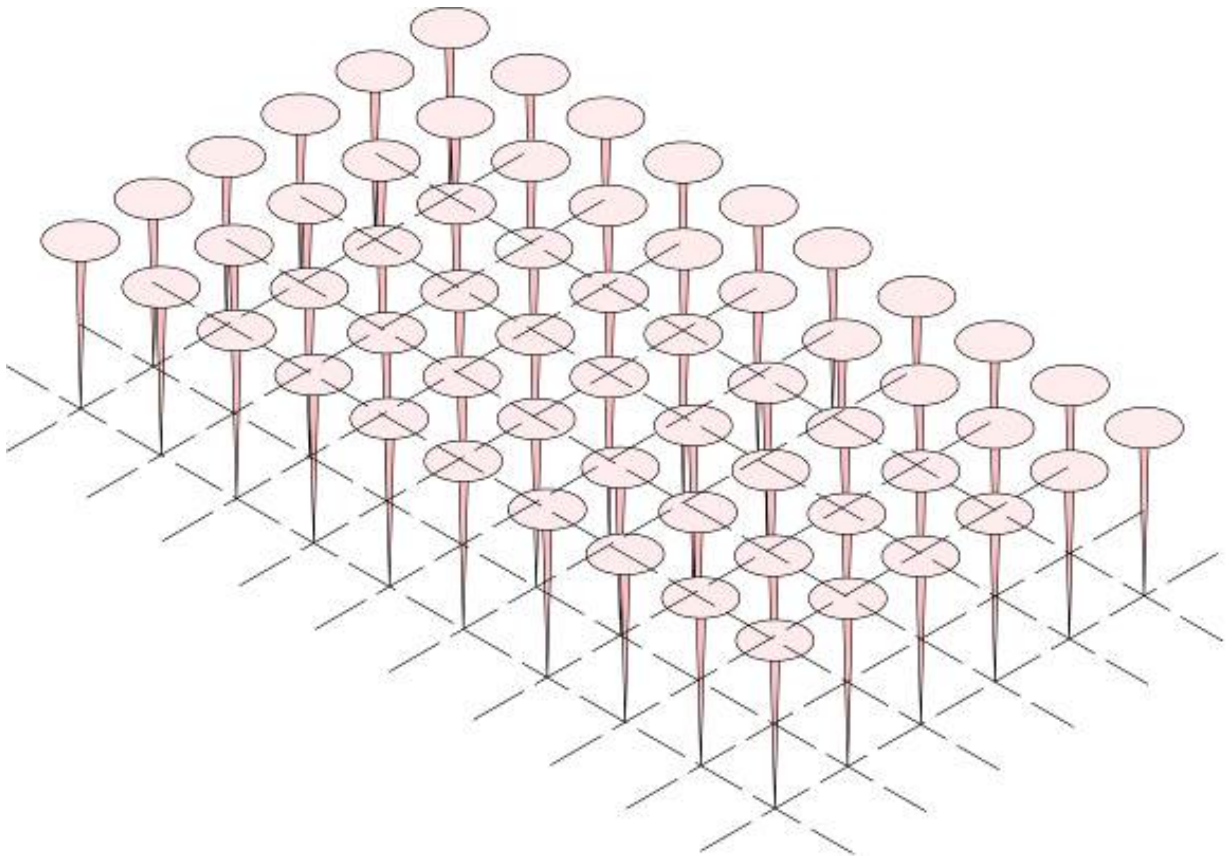


Figura 52. Retícula de columnas utilizada para la creación de la sala de trabajo.

Como vemos, se utiliza una retícula cuadrada perfectamente de 6 columnas en un lado por 10 en la dirección longitudinal. Con ésta retícula se crea la totalidad de la gran sala de trabajo, añadiendo posteriormente una planta intermedia de oficinas como sabemos bordando la línea perimetral de columnas.

Todas las columnas de borde están retranqueadas 1 metro del cerramiento exterior, haciendo que éste sea mero revestimiento y creando un voladizo que sirve para formar la rotura ya citada en multitud de ocasiones.

Con éste retranqueo y el esquema utilizado en cuanto a su colocación, de las columnas, podemos observar que al tipo de diagrama de los citados que más se podría asemejar sería al utilizado por Le Corbusier, el esquema Dom- Inó.

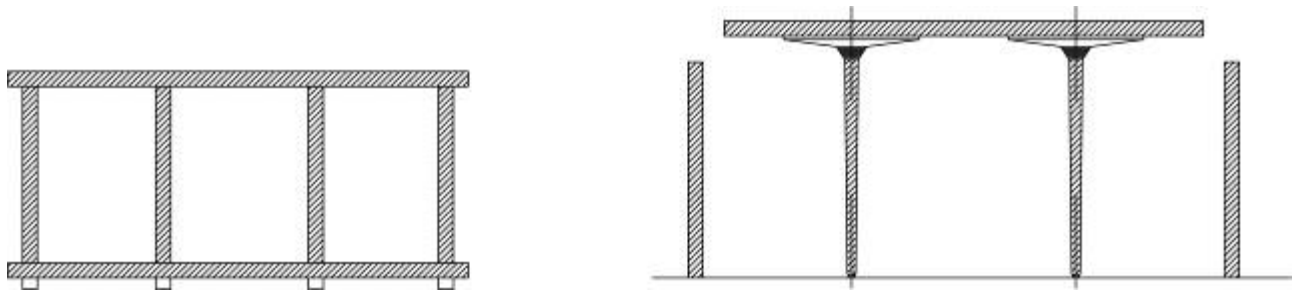


Figura 53. Comparación con diagrama Dom-Inó

Como podemos ver se podrían ver como parecidos, pero nada más lejos que eso, ya que uno de los principios del esquema de Le Corbusier, era el continuum horizontal, cosa que en nuestro esquema brilla por su ausencia, de manera buscada. Ya que como se ha hablado ya anteriormente, Wright rompe tanto las esquinas como el plano horizontal superior, en busca de eso de romper la caja y el continuum.

En cuanto a los otros diagramas citados, el icónico y el simbólico, en mi opinión creo que nos volvemos a encontrar en una situación un poco a caballo entre ambos diagramas. El caso es que el edificio posee una forma buscada intencionada por el propio arquitecto, intentando conseguir ese organicismo y esa relación con la naturaleza. Pero se ha realizado de una manera tan pausada y valga la redundancia, de una manera tan natural, que el proyecto se acopla de una manera perfecta a sus funciones internas con el aspecto exterior.

En resumidas cuentas, nos damos cuenta de que no se ha intentado utilizar un diagrama u otro. Sino que se ha llevado a cabo la realización de una idea final desde un principio de una manera coherente, tranquila y con mucha meditación y trabajo. Consiguiendo de ésta forma un híbrido entre esquemas, conceptos e ideas que funciona a la perfección y que no dispara ninguno de éstos en detrimento de otro. Consiguiendo una unidad compositiva orgánica.

### 3.3. Análisis estructural:

En el presente apartado, se va a tratar de analizar de una manera específica el funcionamiento estructural de la actual solución utilizada por Frank Lloyd Wright para el proyecto del edificio de administración de la Johnson Wax y su influencia en la concepción de la arquitectura.

A continuación se crearán propuestas irreales que se podrían haber dado en dicho proyecto y también se intentarán abarcar de una manera lo más precisa y concisa posible. Analizando los beneficios y desventajas de dichas soluciones inventadas frente a las utilizadas por el arquitecto.

Seguidamente se adjuntaran las plantas originales del proyecto extraídas del libro de Jonathan Lipman ya citado en anteriores ocasiones para que veamos las soluciones elegidas desde un punto de vista general pero con exactitud y sin ninguna alteración posible.

Posteriormente empezaremos con el análisis estructural de ellas fijándonos en lo que influye una tipología estructural en la concepción de un espacio, tanto como elementos individuales, columnas, pilares rectangulares, etc; o de manera global, sistema porticado, muros de carga, etc.

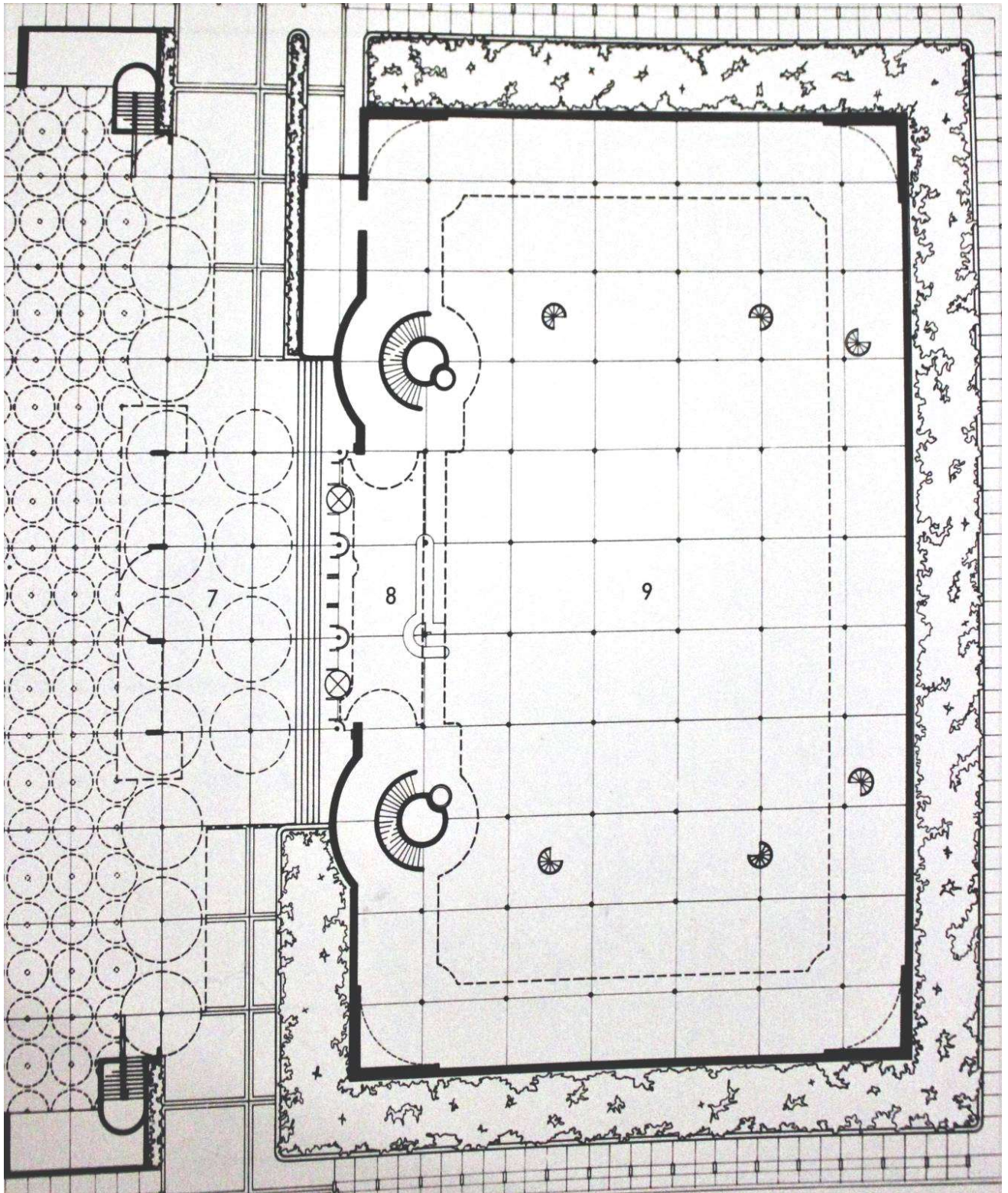


Figura 54. Planta acceso a la gran sala de trabajo

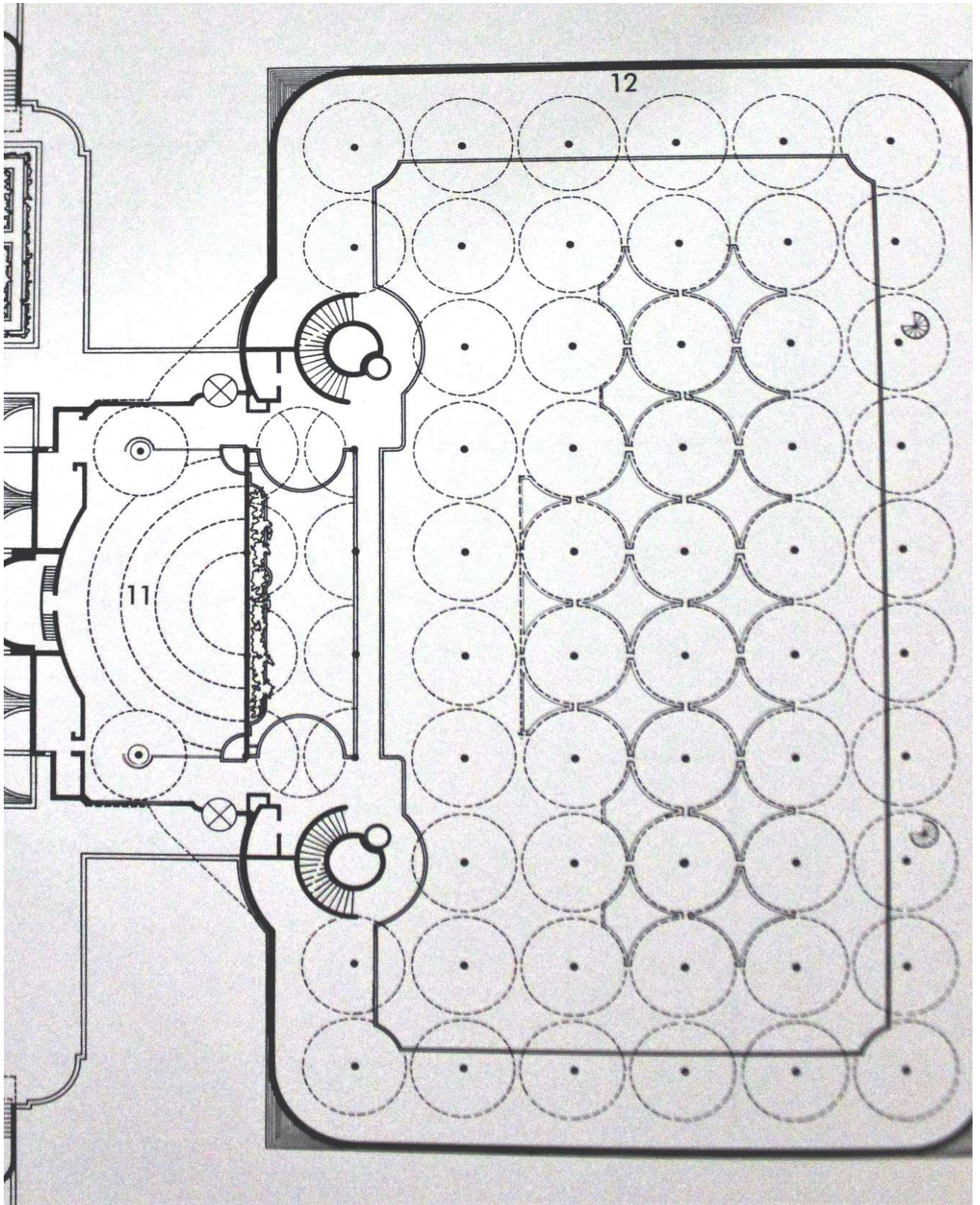


Figura 55. Planta de planta intermedia sobre sala de trabajo.

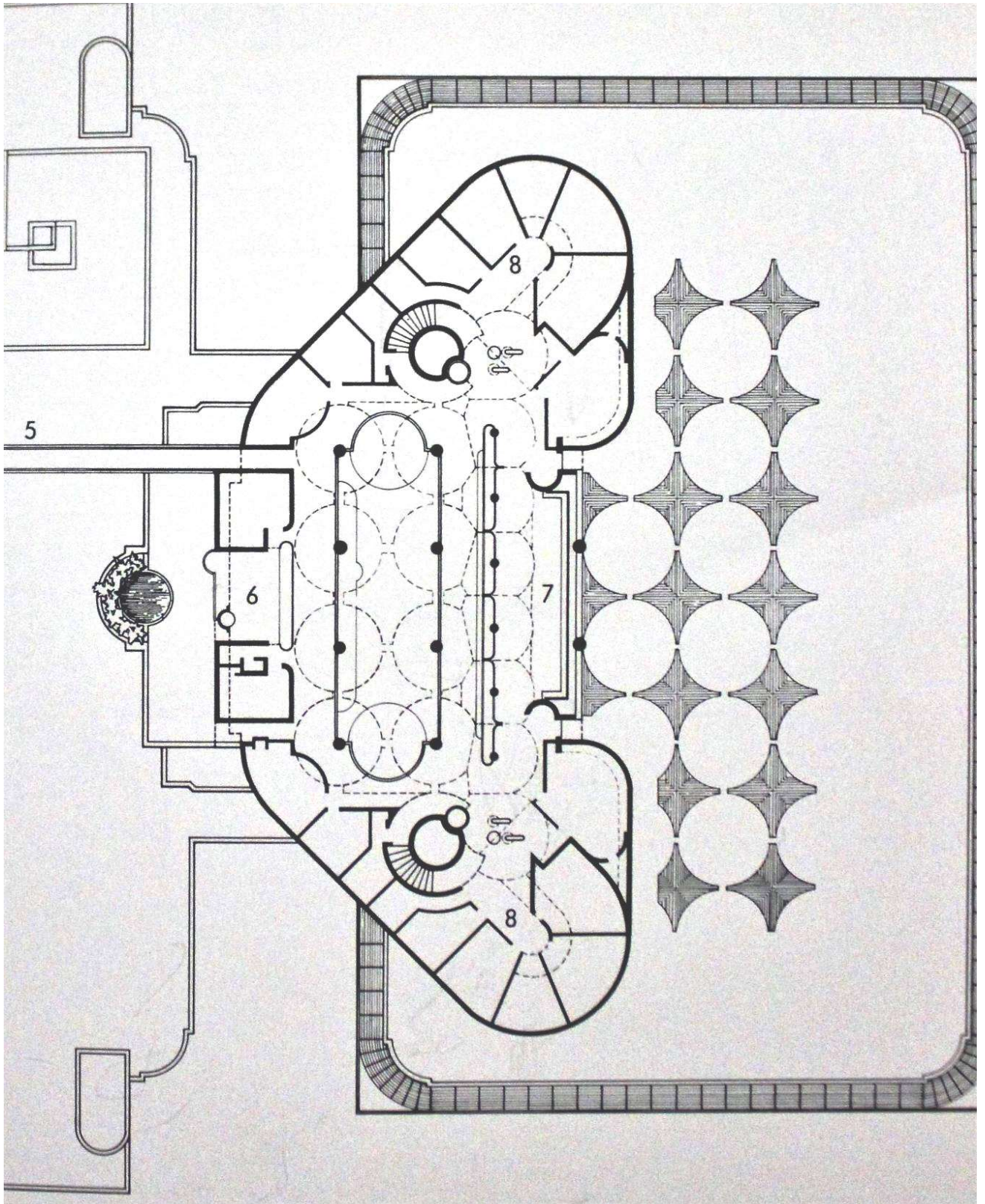


Figura 56. Planta superior.

Estas plantas escaneadas nos muestran las diferentes particiones existentes y la estructura original en la parte del proyecto en la que nos estamos centrando que es la sala de trabajo. Posteriormente como sabemos, se ampliará el proyecto con la inclusión de una torre y de una zona de parking cubierto en planta baja rodeando la torre citada.



A continuación se realizará una planta de acceso dibujada para con ella poder realizar el análisis y los posibles cambios oportunos en búsqueda del por qué de la solución realizada.

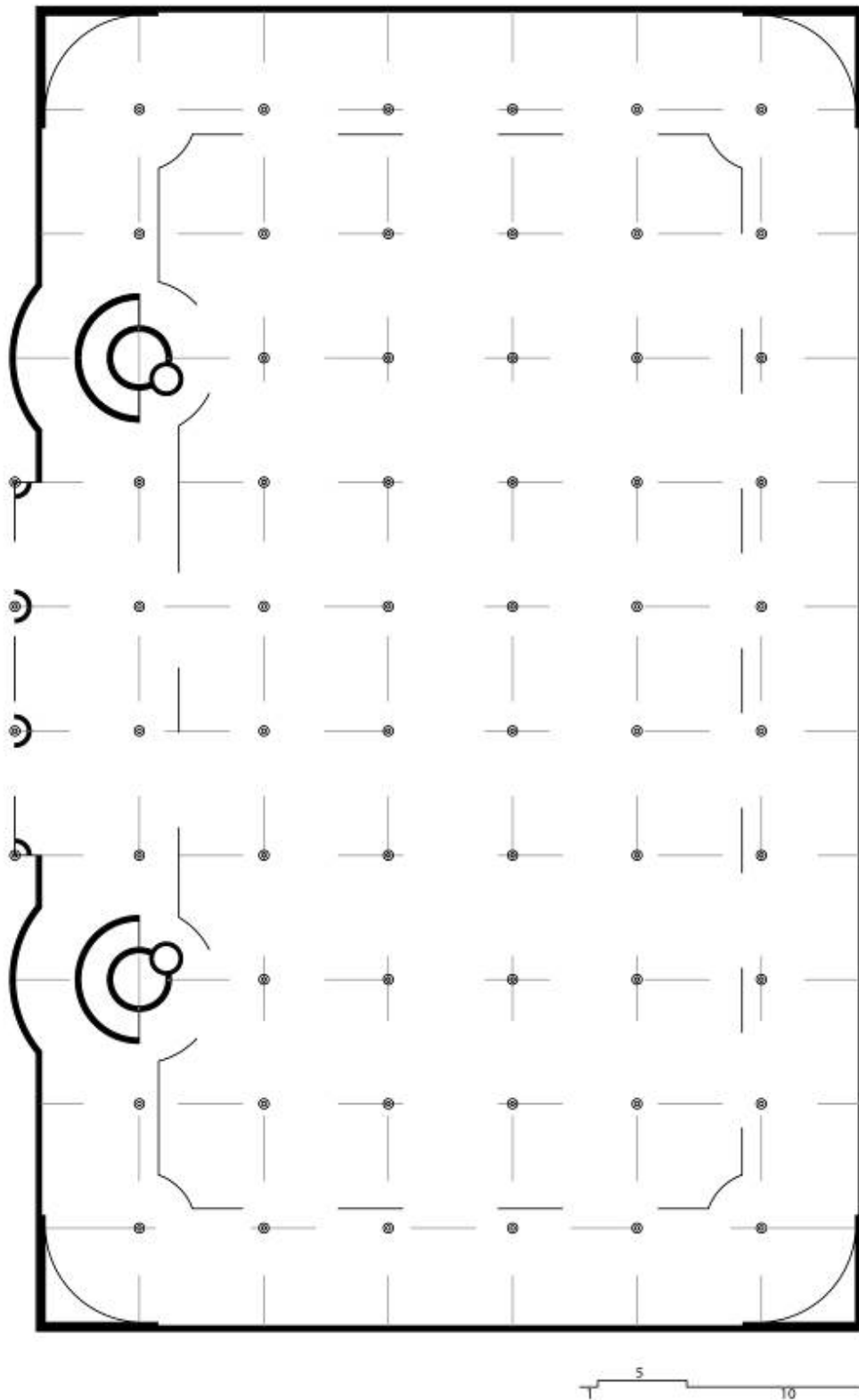


Figura 57. Planta esquema Escala: 1/300

A continuación vamos a analizar el funcionamiento de la estructura original en sus dos direcciones principales descubriendo sus puntos más débiles y los fuertes. Posteriormente crearemos como se ha dicho una serie de supuestos para poner en entre dicho las soluciones realizadas.

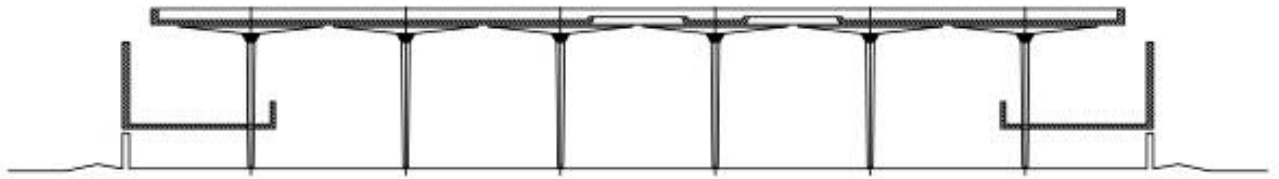


Figura 58. Sección longitudinal sala de trabajo, 6 columnas.

El primer punto que se va a tratar por el hecho de que es necesario explicarlo para la comprensión del funcionamiento, no de la totalidad de la estructura, pero sí de la planta a media altura y de las columnas pasantes es el apoyo del forjado de dicha planta a doble altura sobre el muro perimetral.



Figura 59. Sección transversal sala de trabajo, 10 columnas.

La solución realizada queda un poco oculta en la información del propio Wright, suponiendo que porque es una tipología que no sigue el fin o la idea global del resto del edificio. Lo que se realiza para conseguir solucionar este encuentro es la introducción de pequeños perfiles metálicos en la "rotura" creada debajo del forjado, intentando dar a entender la idea contraria de liviandad y de que el forjado flota. Estos pilares de pequeñas dimensiones se enlazan con un perfil que funciona como viga de atado perimetral que ata el forjado de la mezzanine en su extremo exterior. En el extremo opuesto, el interior, el forjado se apoya sobre una pequeña ménsula creada en la parte baja de la columna solucionando con estas dos opciones el funcionamiento. Ver imagen inferior, a la izquierda la solución sobre el muro y a la derecha la ménsula realizada en la columna

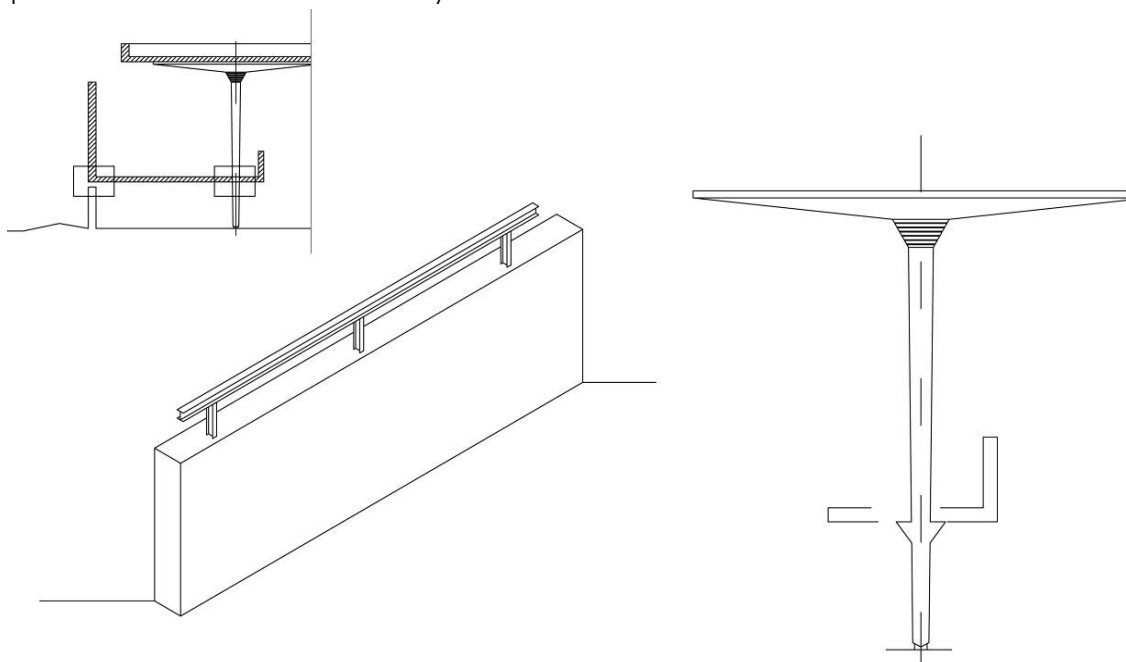


Figura 60. Esquemas de las soluciones realizadas por Wright en cuanto al forjado de la planta intermedia.

Una vez tratado el tema anterior, solo falta recordad el funcionamiento de la estructura de forma global en nuestro proyecto. La estructura, como se puede ver en la planta adjunta superior y en las secciones en sus dos direcciones principales, consta de una retícula de pilares de 7m x 7m totalmente regular exceptuando los bordes, donde la luz disminuye ligeramente hasta 5,65m ya que están en voladizo.

Como sabemos las columnas se ensanchan en la parte superior creando una especie de bandeja que recoge los esfuerzos de la cubierta. Estas trabajan en ménsula, llegando casi a ser tangenciales una de otra pero dejando un pequeño espacio entre ellas que queda unido por la colocación de una pequeña viga, en similitud a la conocida imagen del puente cantilever.

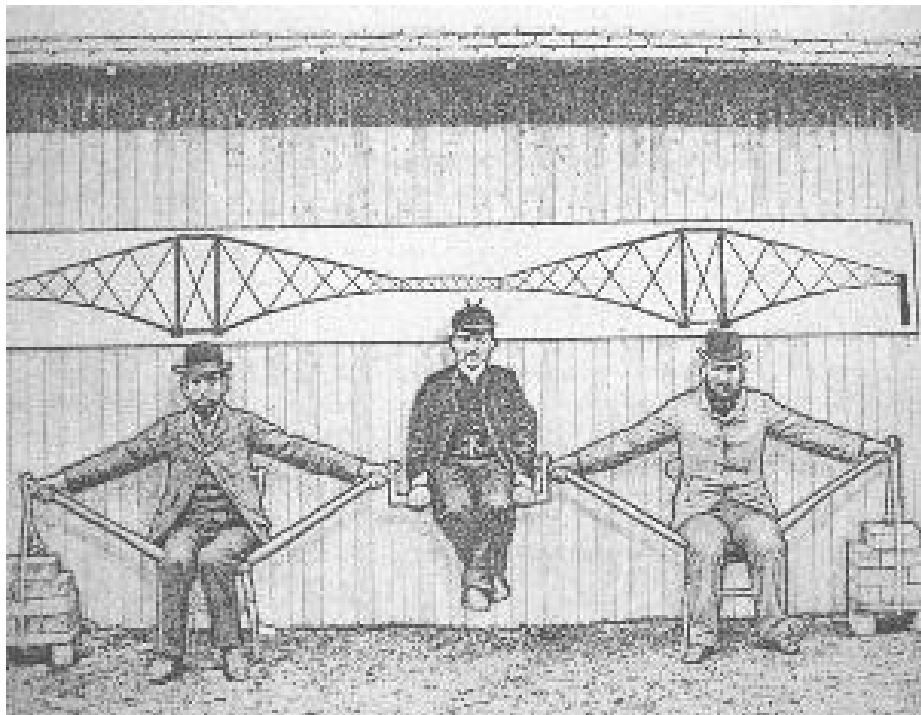


Figura 61. Imagen del funcionamiento de la viga Gerber o Cantilever.

Como se conoce, el funcionamiento de esta tipología se basa en la introducción de articulaciones a una viga continua convirtiéndola en isostática. De esta forma se convierte en una serie de vigas apoyadas prolongadas en sus extremos por ménsulas en vanos alternos, uniéndose entre sí mediante el apoyo de vigas en los extremos de éstas.

Posee una serie de ventajas sobre la viga continua, como puede ser que la ley de momentos flectores, que tienen signos alternos en apoyos y centros de vanos, siendo de ésta forma los valores máximos menores que en la viga continua.

Como se puede observar en la imagen superior, el sistema consta de apoyos fijos, que en éste caso serían los dos hombres de los extremos; con la colocación de una carga extra en los extremos exteriores de la ménsula que ayuda a levantar la parte intermedia, que permanecería inactiva, hombre sentado en el centro.

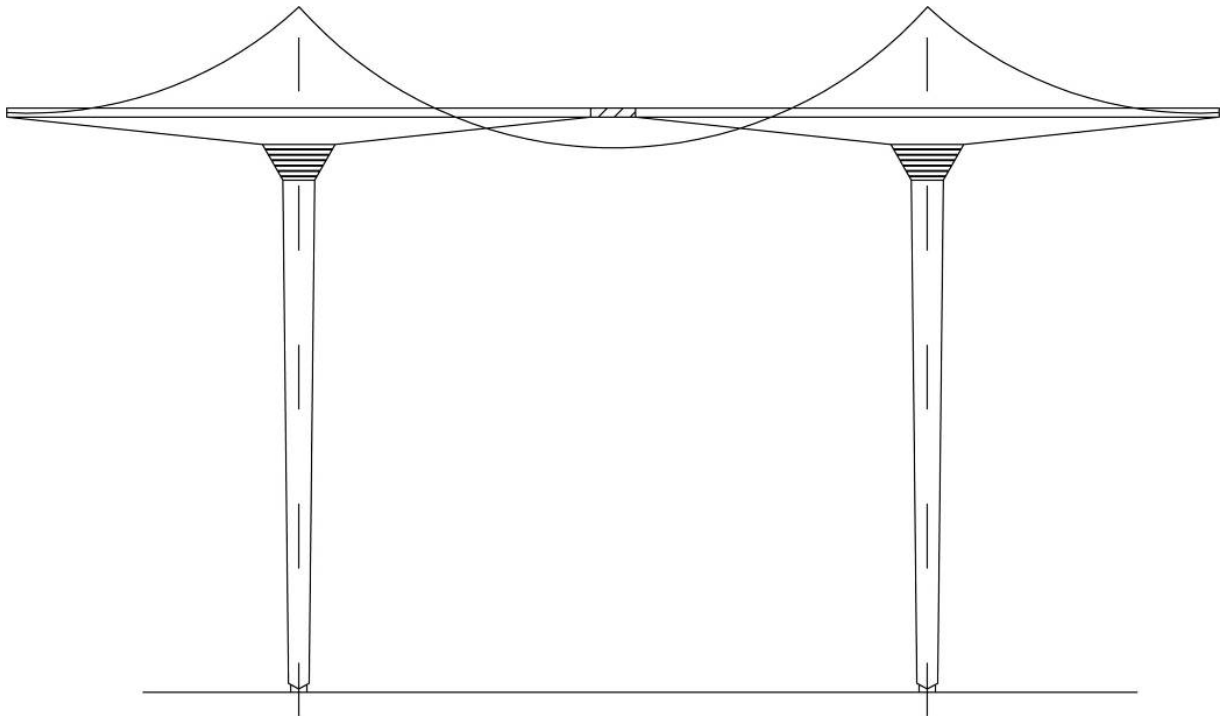


Figura 62. Esquema cantilever en la estructura de Wright.

En la estructura analizada, la carga adicional de los extremos sería el voladizo perimetral existente, y las ménsulas son los Pétalos de las columnas en su interior, apoyando superiormente como se puede observar pequeñas vigas que enlazan toda la estructura haciendo que funcione como una de manera perfecta.

Compositivamente, esta estructura tiene una influencia muy importante en la concepción del espacio a tratar, ya que primeramente, los voladizos perimetrales citados permiten la apertura de una ventana corrida de manera también perimetral; segundo, al crear ménsulas, en éste caso de forma circular ya que están en las dos direcciones, y unirlos únicamente mediante pequeñas vigas de conexión, se consigue la posibilidad de la entrada de luz cenital de una manera muy orgánica con la forma del negativo de la estructura.

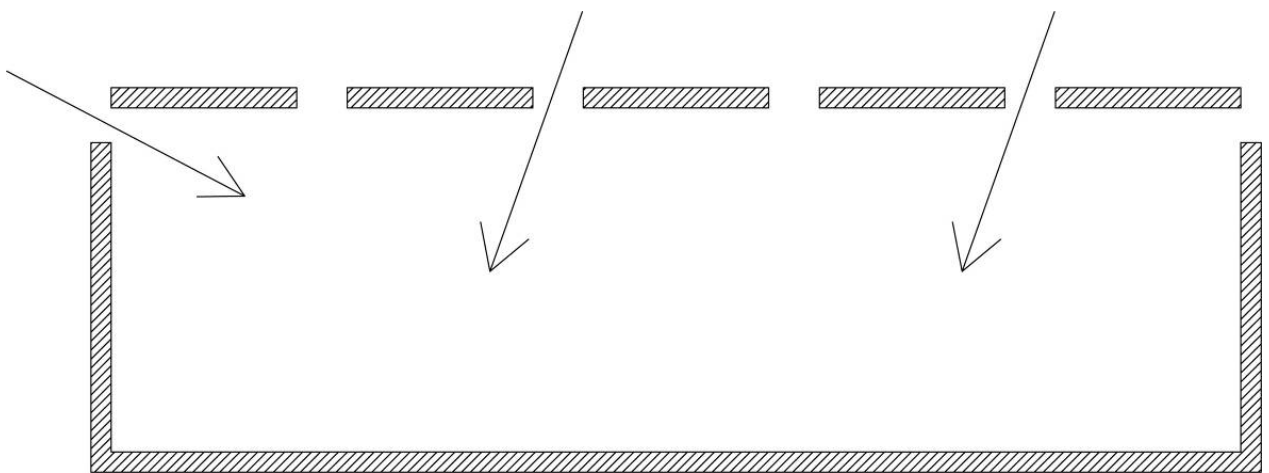


Figura 63. Esquema de la influencia de la estructura en la entrada de luz.

Ya interiormente, la elección de esta estructura y no de otra también influye representativamente en la calidez del espacio y en su manera de fluir.

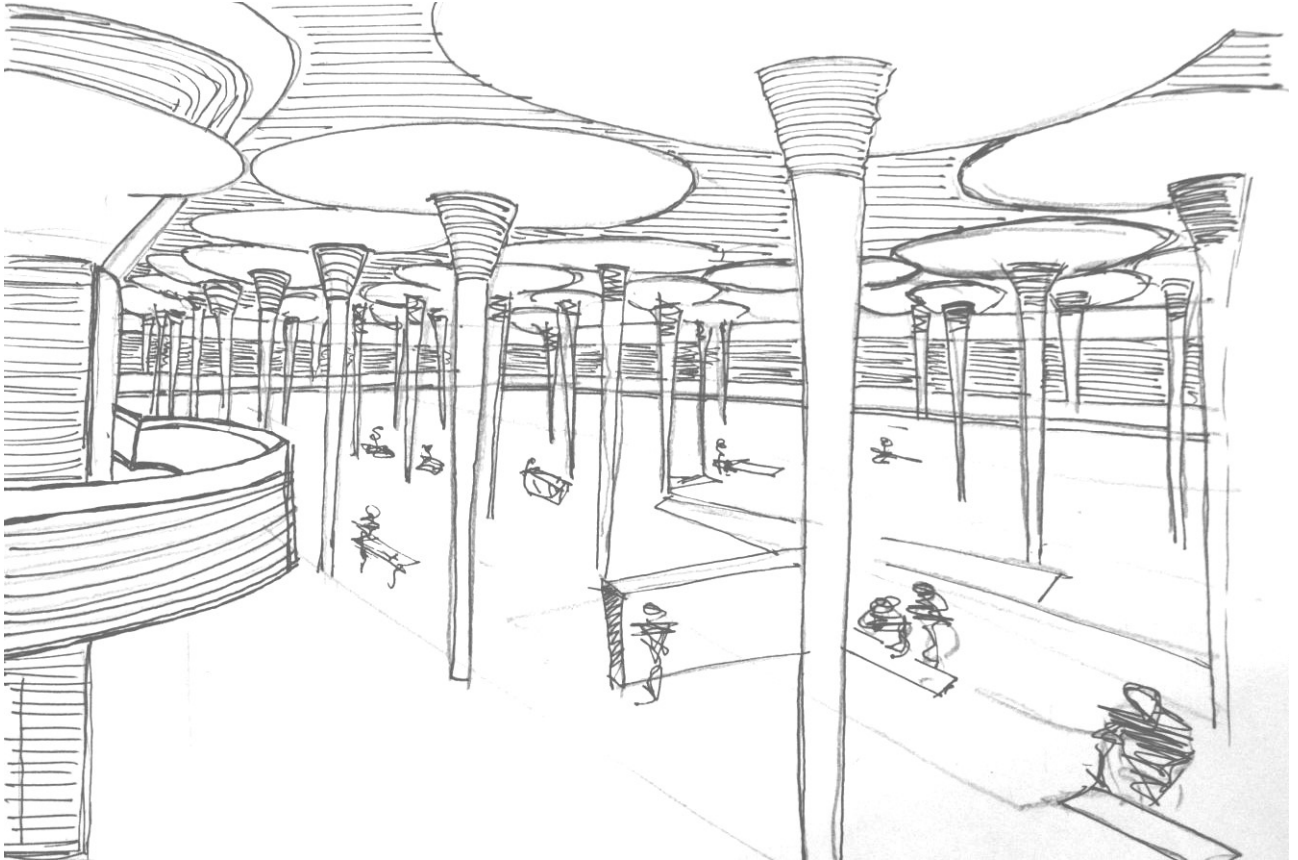


Figura 64. Dibujo esquema de influencia de la estructura en la concepción del espacio y la arquitectura.

Una vez comprobado la influencia que tiene la estructura elegida por el propio Wright en la concepción de la arquitectura, del espacio y de la percepción de la luz, como se puede observar en la ilustración superior. Se va a tratar de analizar de una manera similar la influencia en estos aspectos de los supuestos elegidos comparando puntos para sacar a la luz el razonamiento del arquitecto para la elección de esta tipología.

Una vez datada la parte compositiva en relación con la estructura, antes de proceder a la descripción y análisis de las propuestas, se realizarán una serie de cálculos aproximados de las cargas de la cubierta, permitiendo de éste modo una comparación en cuanto a la utilización de estructura dependiendo de las opciones creadas.

Para ello, se ha estimado el peso de la cubierta sobre la sala de trabajo, ya que el análisis se centra en este espacio. A continuación se puede ver los cálculos realizados:

- Evaluación de cargas (teniendo ya en cuenta las sobrecargas de uso y tabiquerías):
  1. Peso propio de cubierta en zona maciza 5 Kn/m<sup>2</sup>
  2. Peso propio de cubierta en zona acristalada de lucernario 0,35 Kn/m<sup>2</sup>
  3. Peso de cubierta más piso superior en zona de lóbulos 11,2 Kn/m<sup>2</sup>
  4. Acciones variables de carga por nieve inferior a 1000m 1 Kn/m<sup>2</sup>

Para poder utilizar éstas cargas como cálculo general en cuanto a un aproximación, ya que los resultados solamente se utilizaran para comparar aproximadamente las rentabilidades de los supuestos estructurales, se ha realizado una media de las tres cargas permanentes anteriormente

dichas con el fin de tener una carga general de la cubierta sobre la gran sala de trabajo del edificio de Wright.

- Media de cargas permanentes  $5,62 \text{ Kn/m}^2$
- Teniendo en cuenta el peso de la nieve  $6,62 \text{ Kn/m}^2$

Esta media se va a utilizar de aquí en adelante para la comparación de las diferentes estructuras en lo que Aroca llamó cantidad de estructura utilizada.

#### (a) Utilización de otro tipo de elementos verticales:

Los pilares o columnas utilizados en éste proyecto, como se ha visto, son elementos bastante especiales en cuanto a forma y a funcionalidad. Por lo que cualquier cambio que queramos introducir en este aspecto será muy representativo para la percepción del espacio.

Por otro lado, estructuralmente hablando, los cambios no producirán muchos problemas, ya que el elemento utilizado no recibe ningún momento en cabeza al ser la retícula regular y enlazados, por lo que únicamente tiene que transmitir un esfuerzo normal vertical en su eje.

De éste modo, en este apartado analizaremos como influiría en la percepción del espacio un cambio formal en los elementos verticales portantes. Teniendo en cuenta, que habría que cambiar el sistema estructural ya que el original funciona en su totalidad por las columnas citadas, pero la influencia de los cambios en cuanto a la tipología estructural se tratan en los apartados posteriores.

El primer problema que debemos de tratar es el del saneamiento, ya que en el sistema original este discurre por el interior hueco de las columnas y con cualquier cambio que realicemos se debe de buscar una nueva localización para estas canalizaciones.

Posteriormente se van a utilizar pilares de sección rectangular, por lo que empezaremos de la misma manera analizando su influencia en el espacio.

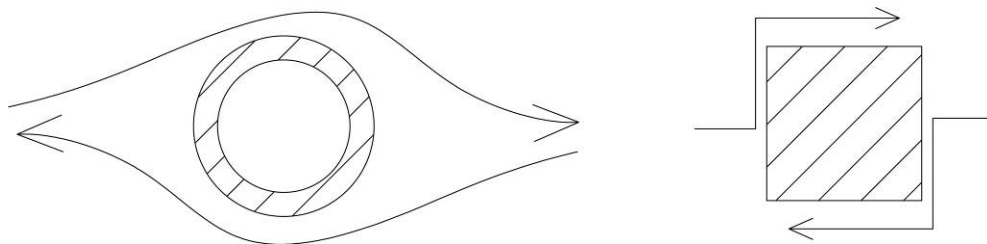


Figura 65. Esquema de fluidez del espacio dependiendo de la sección del pilar.

Como se puede observar, el cambio más influyente al colocar los elementos verticales de sección rectangular es la fluidez del espacio, que con las esquinas se traba y se hace un poco más duro, no tan amable como el conseguido por Frank Lloyd Wright en su proyecto. Pero como veremos más adelante con mayor detenimiento, otros autores lo han usado en sus obras alcanzando de la misma forma excelentes resultados.

En cuanto al problema del saneamiento, influye del modo que se tendría que realizar canalizaciones por la parte exterior del edificio, marcando de ésta forma la continuidad de la fachada. O de

una manera más parecida a la solución original, se tendría que crear un espacio hueco adyacente al pilar macizo utilizando este hueco como espacio para la instalación de saneamiento.

**(b) Cerchas que cubran toda la luz sin apoyos intermedios:**

Este primer supuesto es uno de los más radicales debido al hecho de que eliminaríamos la totalidad del bosque de pilares existente en el proyecto original. Para analizar una solución como la propuesta, se ha utilizado un ejemplo similar en cuanto a concepto, el Crown Hall de Chicago de Mies van der Rohe.

Las cerchas se sujetarían en pilares empotrados en las paredes de cerramiento y cubrirían una luz de 46,6 metros que es la dimensión del lado menor de la sala de trabajo. Ya que vamos a basar nuestro análisis en la comparativa con el Crown Hall, como ejemplo de jácena similar a la utilizada en dicho proyecto de aproximadamente 2 metros de espesor, se utilizará una cercha y la tendremos con una separación de aproximadamente 13,5 metros. Manteniendo de ésta forma un ritmo de entrada de luz cenital algo más similar al original.

La colocación de la viga es un asunto a tratar, ya que cambia mucho compositivamente y perceptivamente el proyecto, por eso se exponen las diferentes opciones reales de ésta propuesta. Existe la opción utilizada por Mies de paraguas, situando la cercha en la parte superior, con la cubierta colgando de la primera; otra opción es la contraria, situar como tradicionalmente se ha hecho la estructura visible por la parte inferior de la cubierta; por último, existe la opción de esconder la estructura, con la cubierta en la parte superior de la cercha pero cubriendo esta también por la parte inferior.

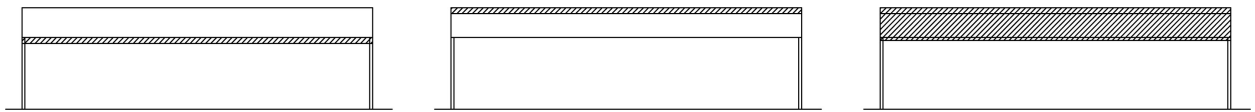


Figura 66. Esquema de posición de la cercha.

En la opción tratada durante el supuesto presente, se ha utilizado la opción central de la imagen superior, dejando la estructura vista por la parte interior de la gran sala de trabajo diseñada por Wright.

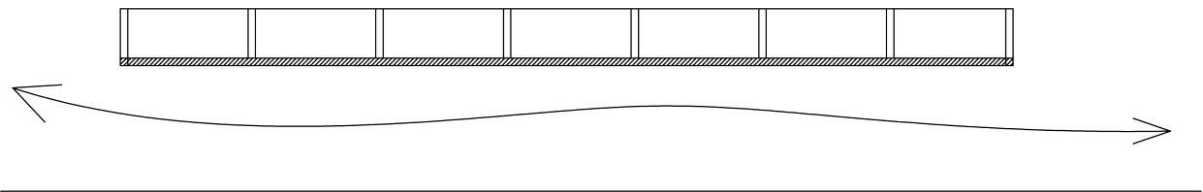


Figura 67. Esquema entrada de luz y espacio en el edificio de Mies van der Rohe.

Hay que tener en cuenta que los proyectos de Mies, como el Crown Hall o la Neuenationalgalerie, permiten la entrada de luz de manera perimetral, dejando que el espacio interior y exterior se mezclen. Así como también Wright, con la diferencia de que éste utiliza pequeñas aberturas perimetrales y la entrada cenital de luz.

Para la utilización del supuesto, se mantiene la "rotura" perimetral, con cortes cada 13,5 metros debido a la existencia de pilares empotrados, y la entrada de luz cenital tal y como lo hace el proyecto original.

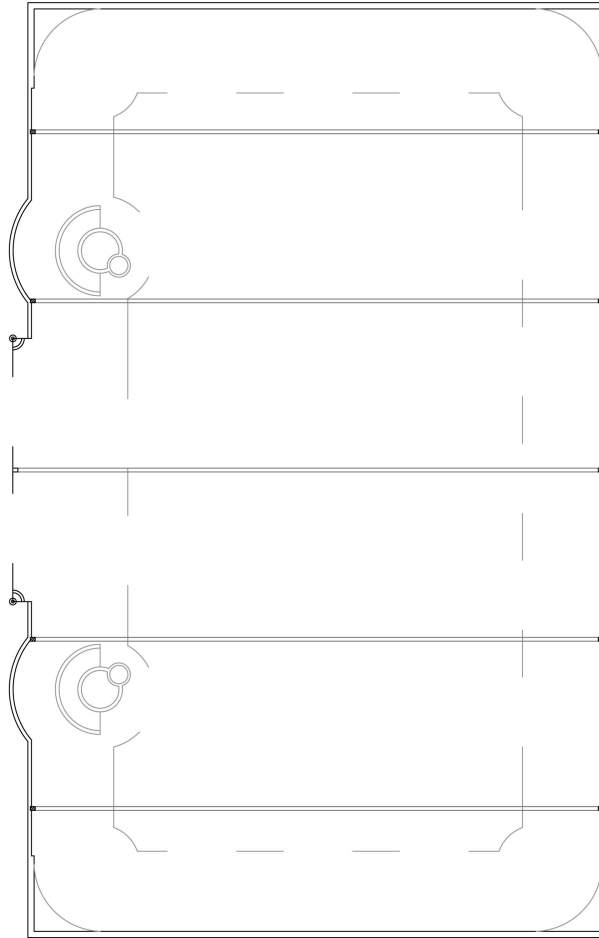


Figura 68. Propuesta de planta con cercha separadas 13,5 metros bi-apoyadas en pilares empotrados.

El cambio, es significativo, ya que deberíamos aumentar la altura de la sala de trabajo debido a que, si la jácena es de aproximadamente 2 metros, toda la zona de la planta intermedia se vería inutilizada. Este problema puede ser el motivo principal de una descalificación para ésta tipología estructural frente a la original.

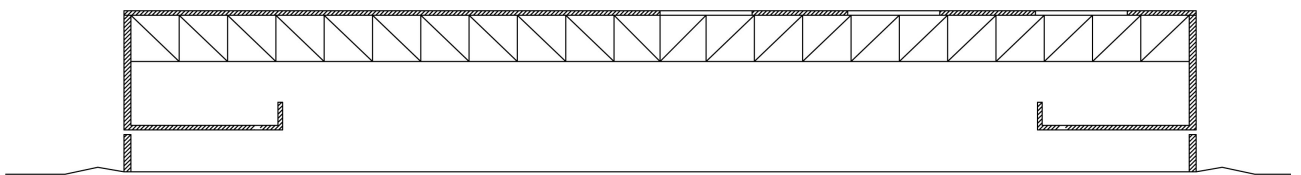


Figura 69. Propuesta de sección con cercha separada 13,5 metros bi-apoyada en pilares empotrados.

Como podemos observar, la planta queda mucho más limpia, totalmente libre de pilares, lo que permitiría una libre disposición en esta, aunque no existiría ningún atenuante de la libertad espacial, función que cumplen los pilares troncocónicos originales. La entrada perimetral de luz, continuaría aunque quedaría interrumpida con los cortes producidos por los pilares empotrados; y la entrada de luz cenital se mantendría, aunque con una entrada un poco menos amable que las formas creadas por los espacios intersticiales de las mushroom columns.

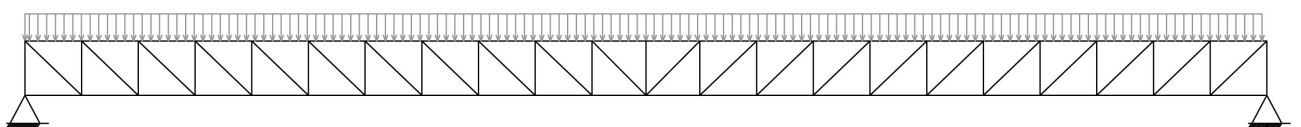
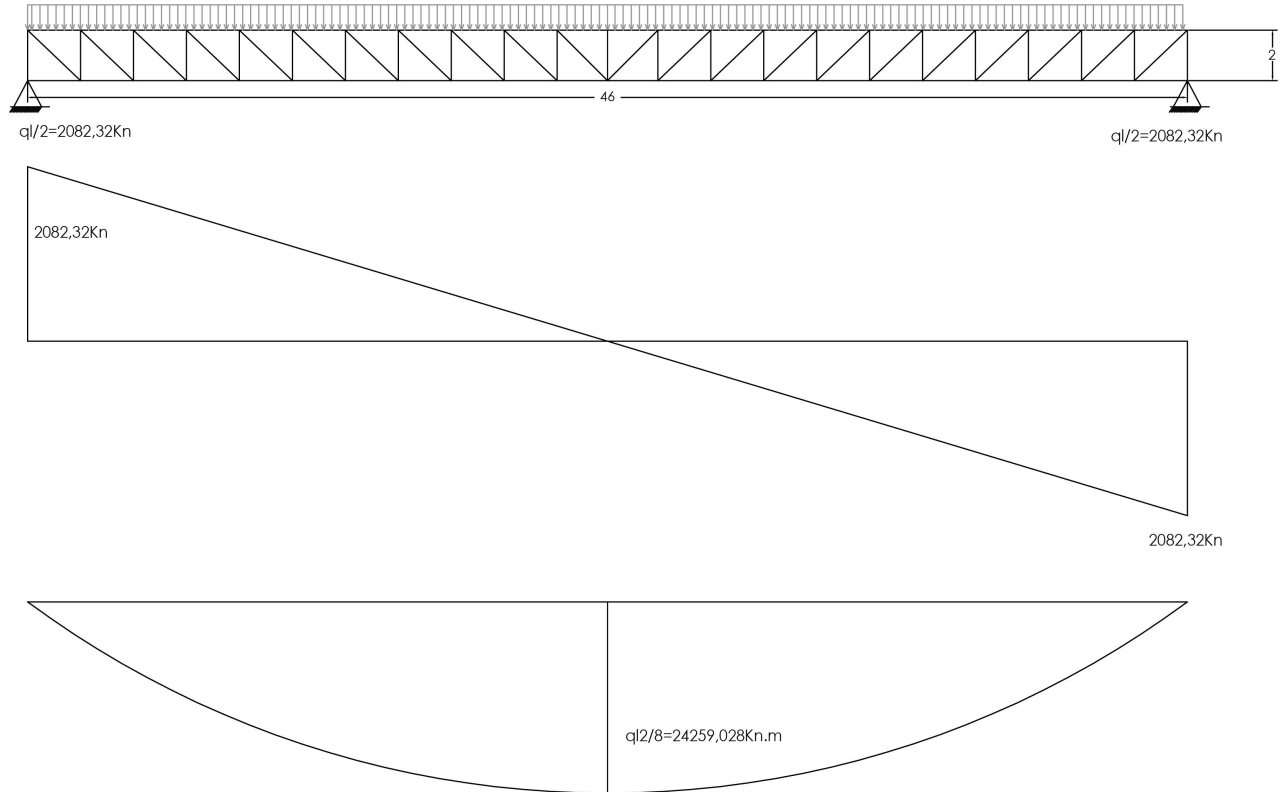


Figura 70. Esquema de cargas sobre jácena bi-apoyada.



Como se ha explicado anteriormente, se ha hecho una media del peso de la cubierta para poder así comparar los diferentes supuestos tipológicos de estructura ( $6,62 \text{ Kn/m}^2$ )\_usándose para conseguir la cantidad de estructura necesaria para aguantar los esfuerzos:

Como la luz entre cerchas es de 13,5m:  $q=6,62 \text{ Kn/m}^2 \times 13,5= 89,37 \text{ Kn/m}$



Con el momento calculado anteriormente, utilizando la fórmula del brazo de palanca  $NxZ=M$ , conociendo la altura de la cercha que como se ha dicho es 2m, se calcula el axil actuante en dicho brazo de palanca.  $N= 24259,028\text{knm}/2\text{m}= 12129,51\text{Kn}$ . A partir de este axil, se hallará la cantidad de estructura de los cordones superior e inferior.

Donde  $A(\text{cantidad de estructura}) = N (\text{mayorado } 1,45) / f = 1758778,95\text{Kg}/2600\text{kg/cm}^2= 676,45\text{cm}^2$

Se calculan ahora las cargas actuantes en el nudo del apoyo exterior y en un nudo de la parte media de la cercha, según las ecuaciones siguientes:



$$1 \rightarrow F=q/12 \rightarrow F=89,37\text{kn}/\text{m} \times 46\text{m}/12=342,58\text{Kn}=34258\text{kg}$$

$$2 \rightarrow F=q/6 \rightarrow F=89,37\text{kn}/\text{m} \times 46\text{m}/6=685,17\text{Kn}=68517\text{kg}$$

De igual manera que en la parte anterior calculamos el área de estructura necesaria para los montantes extremos y para los medios.

$$1 \rightarrow A=34258\text{kg}(1,45)/2600\text{kg/cm}^2=19,105\text{cm}^2 \quad \text{IPE160}$$

$$1 \rightarrow A=68517\text{kg}(1,45)/2600\text{kg/cm}^2=38,211\text{cm}^2 \quad \text{IPE240}$$

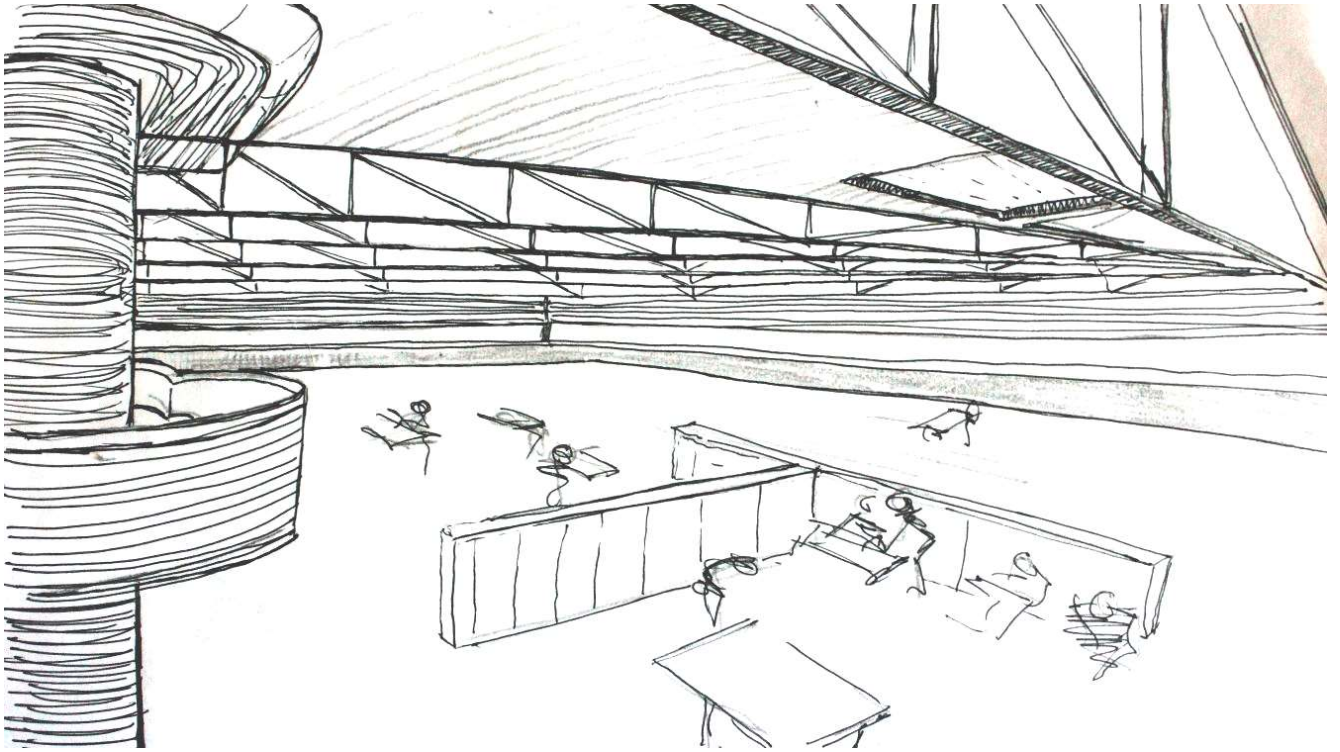


Figura 71. Dibujo esquema percepción sala de trabajo con la tipología propuesta.

La libertad de la planta producida por la desaparición de los elementos verticales, crea una desventaja en cuanto a la calidez del espacio, quedando vacío, como una nave industrial de fabricación en serie, en vez de un lugar de trabajo familiar que es lo que se buscaba. Además, la entrada de luz por lucernarios más ortogonales ayuda a esa pérdida de calidad sensorial y de luz, además de perder la horizontalidad requerida por Wright, ya que las divisiones producidas por las cerchas recrearían sombras en la dirección de estas cortando la horizontalidad.

En cuanto a las cargas, como se ha visto por la cantidad de estructura requerida, la carga actuante es bastante pequeña, de ahí que los montantes reciban un axil bajo. En cambio, al ser unas luces considerables, los cordones superior e inferior requieren una cantidad de estructura importante para soportar las flexiones y tracciones pertinentes.

### (c) Vigas con apoyos múltiples según distribución original:

En el siguiente supuesto se han vuelto a introducir soportes intermedios verticales, con la intención de que den la calidad que se perdió en el supuesto "b". Para la vuelta a la retícula cartesiana de pilares, no se puede utilizar otro que un ejemplo ya citado en el presente trabajo. La biblioteca Jussieu de Rem Koolhaas.

Separándonos un poco de las superficies horizontales o "datums" utilizados por Koolhaas, aquí nos vamos a centrar en la retícula simplemente utilizando vigas y pilares de hormigón para la resolución de la estructura de la gran sala de trabajo.

Se van a exponer dos ejemplos similares pero cambiando aspectos que creemos fundamentales en cuanto a la diferente percepción de la arquitectura. En el primero, se va a mantener la misma distribución de pilares, manteniendo éstos con sección circular pero utilizando vigas en parte superior para la conformación de la cubierta.

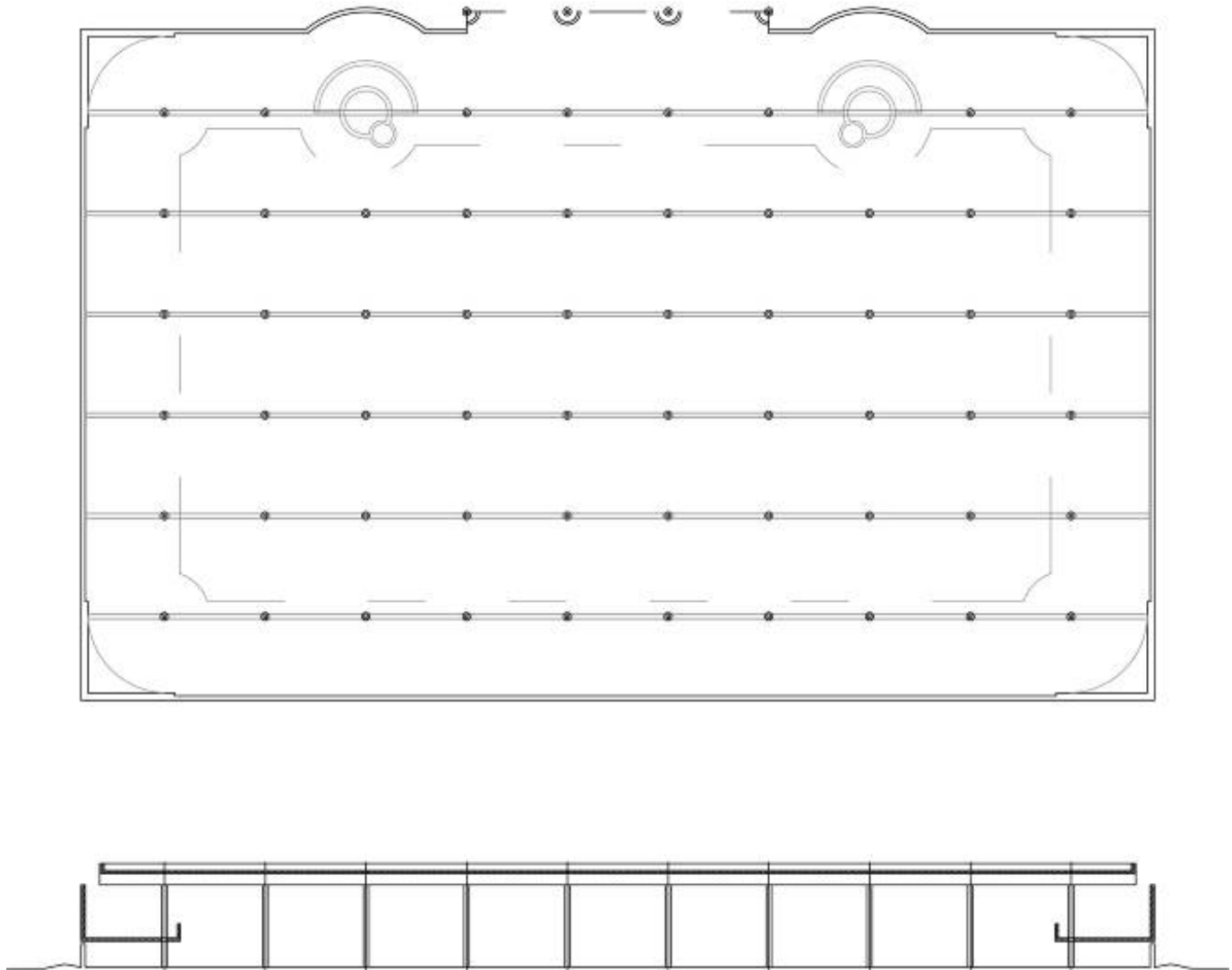


Figura 72. Propuesta con viga pasante y apoyos múltiples según distribución original.

Esta propuesta implica pocos cambios formales en cuanto al espacio y a la percepción de la luz, ya que la fluencia del espacio será muy similar, exceptuando la desaparición de los "petal" de las columnas originales, que veremos cómo influye en la percepción de la arquitectura. Las roturas de Wright perimetrales se podrían mantener pero creando un zuncho perimetral a todo el edificio. En cambio la entrada de luz cenital, volvería a perder la calidez y la amabilidad de las originales, ya que las formas creadas tendrían que ser de nuevo mucho más geométricas.

Seguidamente se procederá a realizar los cálculos aproximados pertinentes a la propuesta expuesta. En este caso, se calculará los axiles actuantes sobre pilares, conociendo la cantidad de estructura del pilar y los momentos flectores de las vigas para conocer lo mismo pero en dichas vigas.

Las luces en este supuesto son de 7 metros x 7 metros como en la disposición original por lo que la carga distribuida actuante en la parte superior de la viga será de  $q=46,34 \text{ Kn/m}$

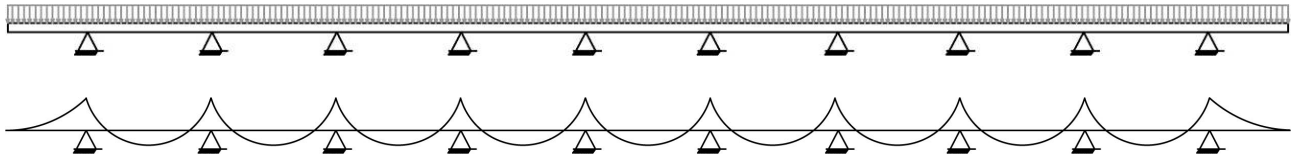


Figura 73. Esquema de cargas y momentos sobre viga con luces de 7m

Se necesita el momento flector máximo para a partir de él calcular el área de estructura, este momento será existente en el centro del vano con un valor de:

$$\rightarrow M = ql^2/16 \rightarrow M = 46,34 \text{ Kn/m} \times 49 \text{ m}^2 / 16 = \underline{141,91 \text{ Knm}} = \underline{1447079,28 \text{ kg cm}}$$

Por otro lado es necesario calcular la carga actuante sobre un pilar:

$\rightarrow$  Carga  $q = 6,62 \text{ Kn/m}^2$  y área tributaria correspondiente a cada pilar de  $7 \times 7 = 49 \text{ m}^2$  por lo que el axil actuante sobre cada pilar es de  $49 \times 6,62 = \underline{324,38 \text{ Kn}} = \underline{32438 \text{ kg}}$

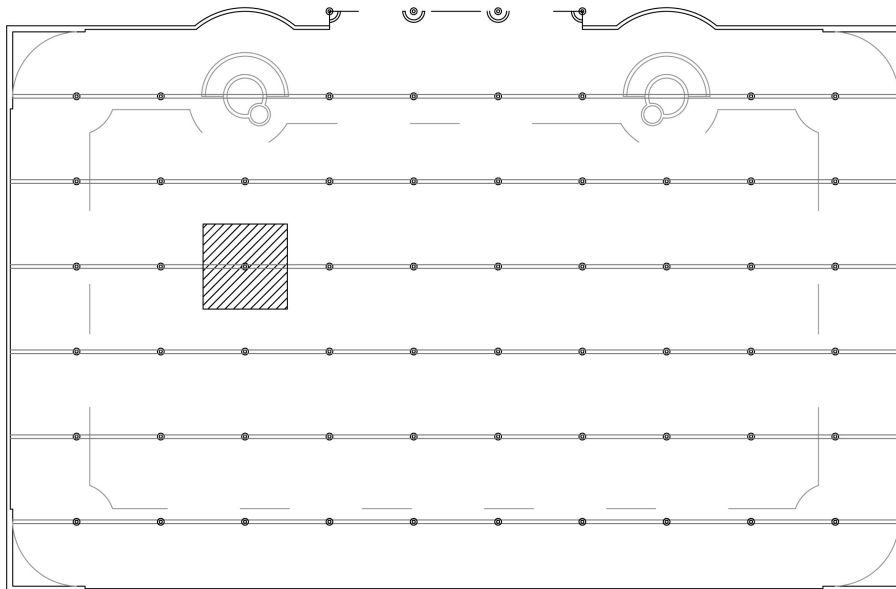


Figura 74. Esquema áreas tributarias de 7x7m

Una vez se tienen los valores calculados en la parte superior, se puede proceder al cálculo de la cantidad de estructura necesaria para vigas y pilares:

$$\text{Pilares hormigón: } A = 32438 \text{ kg} (1,45) / 100 \text{ kg/cm}^2 = \underline{470,35 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Pilares acero: } A = 32438 \text{ kg} (1,45) / 2600 \text{ kg/cm}^2 = \underline{18,1 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Vigas: } W = 1447079,28 \text{ kg cm} (1,45) / 100 \text{ kg/cm}^2 = \underline{20982,64 \text{ cm}^3}$$

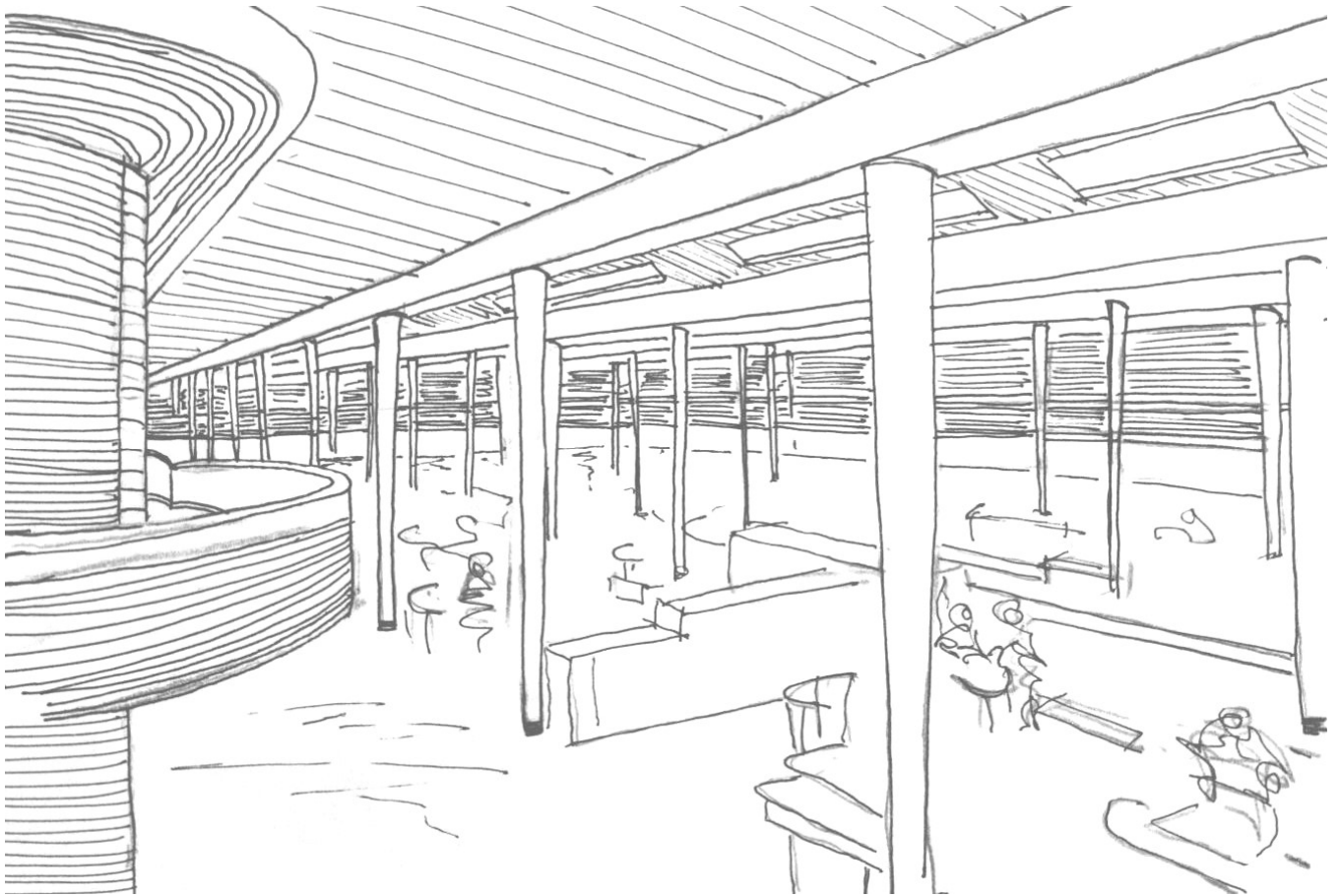


Figura 75. Dibujo esquema percepción sala de trabajo con la tipología propuesta.

En este supuesto, la percepción primera del espacio de la sala de trabajo se asemeja bastante a la original y a los requerimientos de Wright, con líneas horizontales y un arropo de los pilares que da calidez al lugar. La existencia de las vigas puede llegar a vulgarizar el espacio perdiendo la perfección en el detalle y, por último, la luz pierde de nuevo calidez al ser formas mucho más ortogonales al igual que en los supuestos anteriormente escritos.

Como segundo ejemplo, se van a introducir algunos cambios más representativos que en el superior. Visto que espacio de la sala con pilares circulares, aun sin los petal superiores, es bastante fluido. Se van a introducir pilares de sección cuadrada bajo viga pasante tal y como en el ejemplo anterior. Por otro lado, como ya se ha citado, la sección ortogonal de los pilares hace que el espacio sea más grosero, con menos calidez, por lo que se ha optado para asimilar en cuanto a confort, aumentar las luces dejando que el espacio no estuviese tan plagado de pilares.

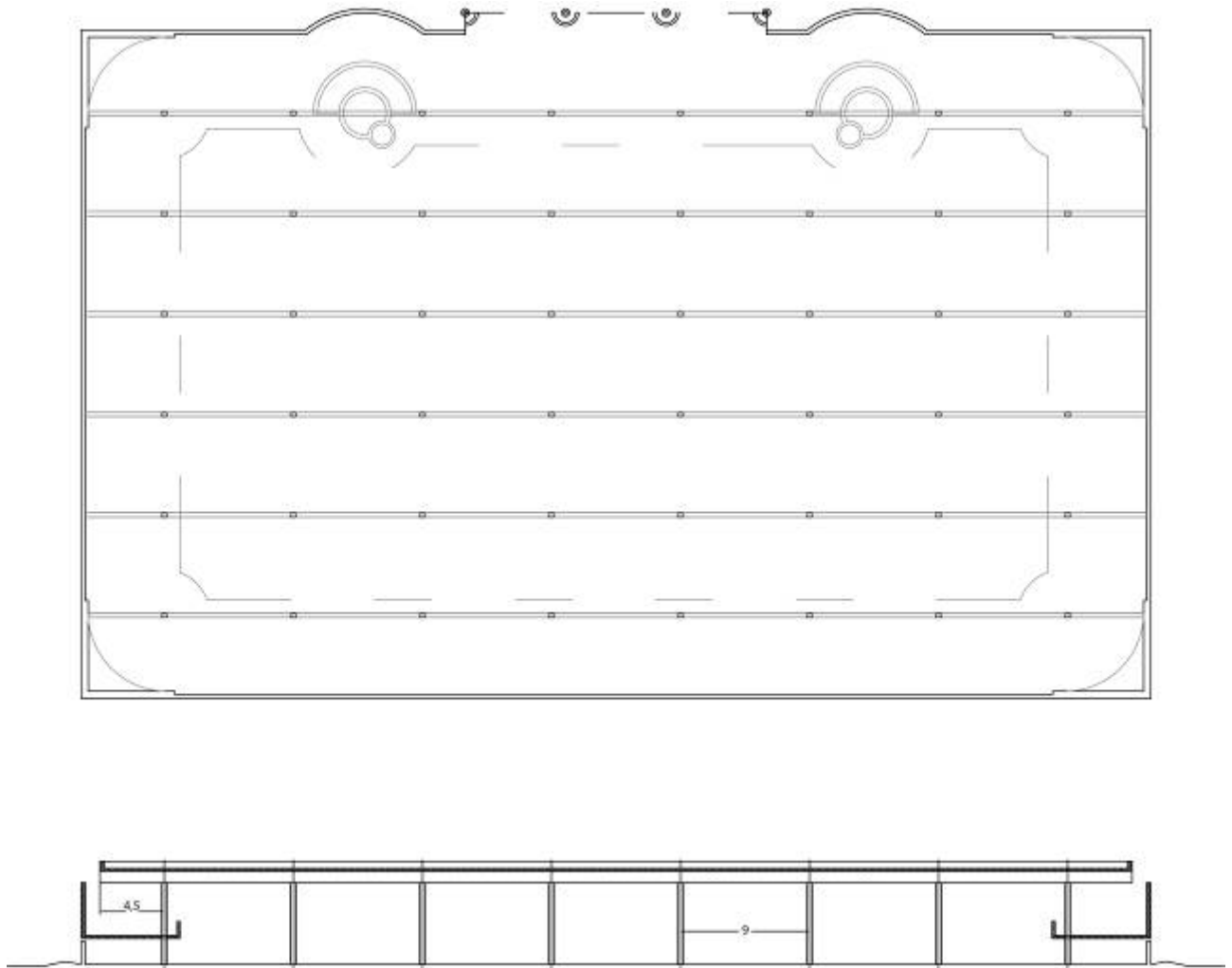


Figura 76. Propuesta con ampliación de las luces a 9 metros.

Aparte de los cambios conceptuales ya citados, las entradas de luz tanto cenitales como perimetrales se mantienen de la misma forma que en el primer ejemplo de éste apartado. aumentando, como posibilidad, las aperturas cenitales, consecuencia de las mayores luces que permitirían huecos de mayor tamaño.

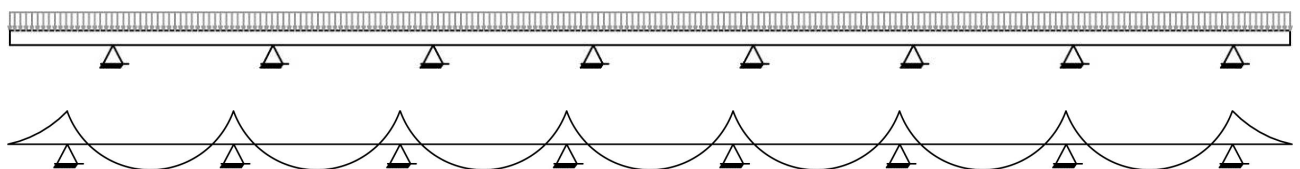


Figura 77. Esquema de carga distribuida sobre y flectores en viga con luces de 9m.

Las luces en este supuesto son de 9 metros x 7 metros variando la disposición original aunque la carga distribuida actuante en la parte superior de la viga será la misma de  $q=46,34 \text{ Kn/m}$

Se necesita el momento flector máximo para a partir de él calcular el área de estructura, este momento será existente en el centro del vano con un valor de:

$$\rightarrow M = ql^2/16 \rightarrow M = 46,34 \text{ Kn/m} \times 81 \text{ m}^2 / 16 = \underline{234,59 \text{ Knm}} = 2392152,26 \text{ kg cm}$$

Por otro lado es necesario calcular la carga actuante sobre un pilar:

→Carga  $q=6,62 \text{ Kn/m}^2$  y área tributaria correspondiente a cada pilar de  $9 \times 7=63 \text{ m}^2$   
 por lo que el axil actuante sobre cada pilar es de  $63 \times 6,62 = 417,06 \text{ Kn} = 41706 \text{ kg}$

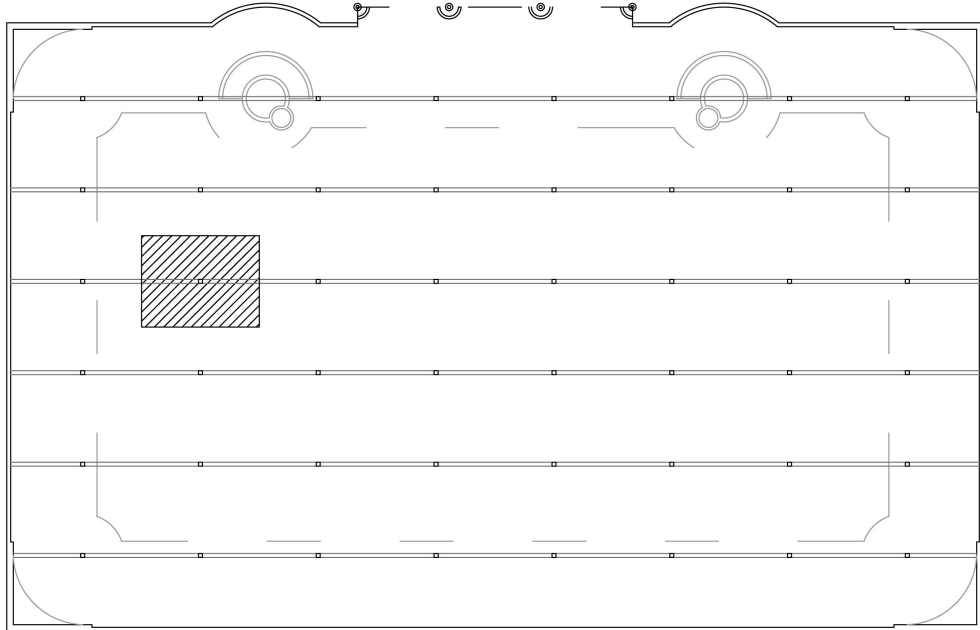


Figura 78. Esquema áreas tributarias de 9x7m

Una vez se tienen los valores calculados en la parte superior, se puede proceder al cálculo de la cantidad de estructura necesaria para vigas y pilares:

Pilares hormigón:  $A=41706 \text{ kg}(1,45)/100 \text{ kg/cm}^2= 604,74 \text{ cm}^2$

Pilares acero:  $A=41706 \text{ kg}(1,45)/2600 \text{ kg/cm}^2= 23,26 \text{ cm}^2$

Vigas :  $W=2392152,26 \text{ kg*cm}(1,45)/100 \text{ kg/cm}^2=34686,2 \text{ cm}^3$

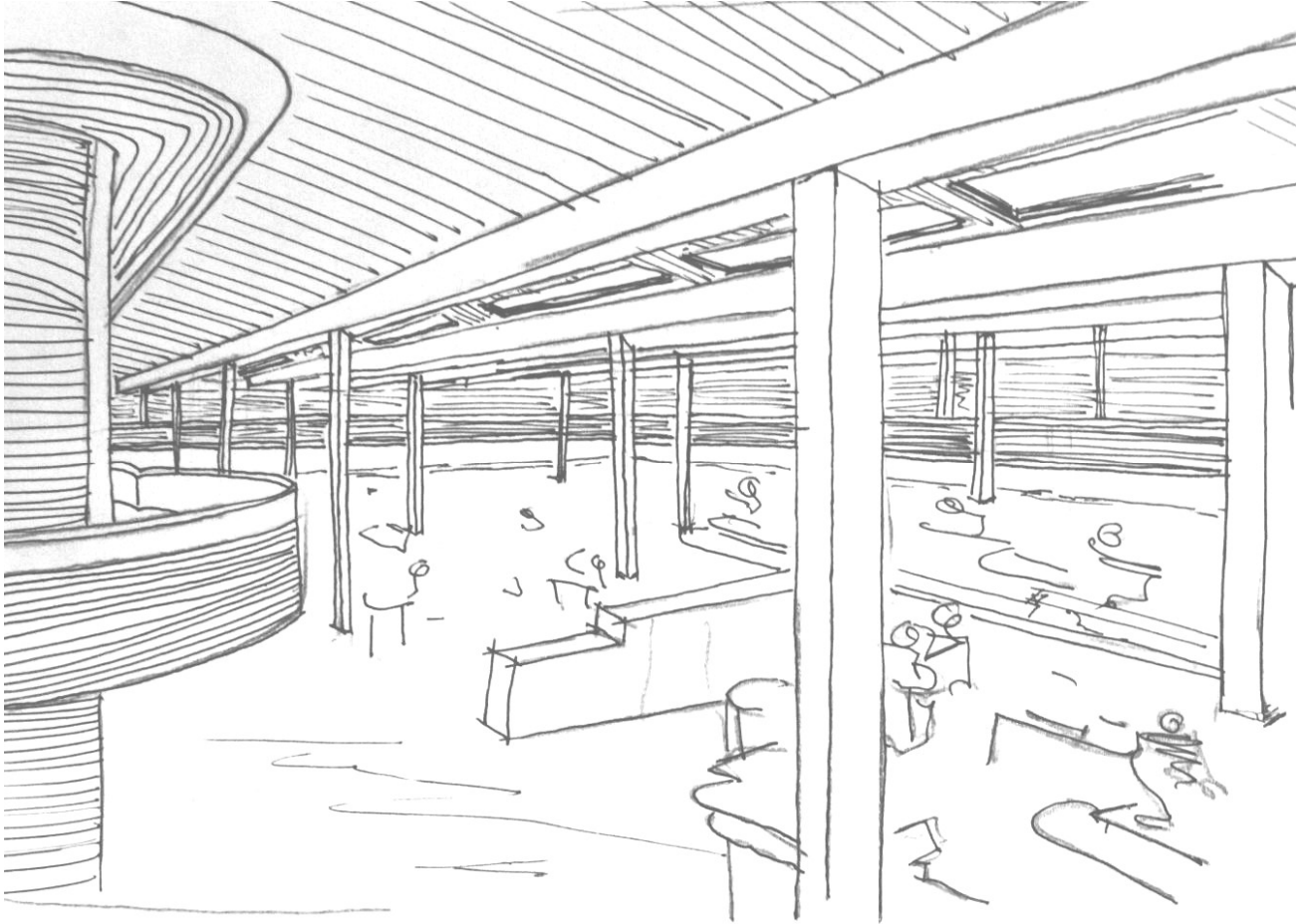


Figura 79. Dibujo esquema de percepción de la sala de trabajo con la tipología propuesta.

La inclusión de los pilares de sección rectangular, crean un espacio más brusco, por lo que se intenta paliar con la ampliación de las luces, dejando que el espacio fluya más libremente al existir un número menor de pilares. Las sensaciones que transmite esta tipología es de sobriedad y escasez compositiva, en mi opinión no apta para un espacio de las características y dimensiones del analizado. Reiterándome en la percepción de la luz, la cual no cambia a lo dicho anteriormente. Además, las sombras que crean los pilares serían angulares, rompiendo la horizontalidad tantas veces citada que Wright perseguía.

En cuanto a la cantidad de estructura, se puede observar que las variaciones no son grandes entre ambos supuestos, sí que es significativa, en cambio, la utilización de pilares de hormigón o de acero en cuanto a dicha cantidad de estructura.

**(d) Vigas con apoyos múltiples y muro de carga perimetral:**

Este supuesto, vuelve a tener una carga bastante radical conceptualmente hablando, ya que con la utilización de un muro perimetral de carga no solo perdemos el voladizo, sino también la idea de romper la caja, ya que de ésta forma la reforzamos.

Como se puede ver en el esquema expuesto en la parte inferior (Fig 76), además de cambiar la idea de proyecto, con ésta propuesta se traslada toda la responsabilidad de la entrada de luz a la parte cenital del edificio. Convirtiendo en éste caso la envolvente en un recipiente de espacio y poniendo en entredicho la comunicación entre el espacio interior y el exterior, que ahora, no se entiende tan claramente como uno solo.



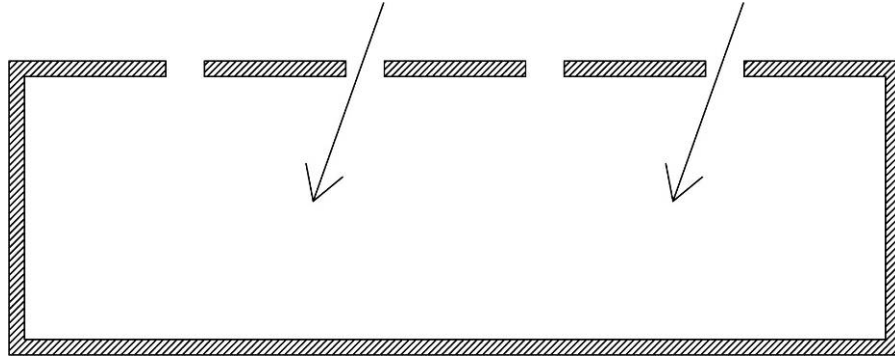


Figura 80. Esquema de caja con la inclusión de muros de carga.

Esta propuesta nos transporta a la época antigua, cuando el material envolvente tenía así mismo propiedades portantes. Más que como propuesta real que se pudiera haber dado, sabiendo que Wright siempre ha defendido la evolución de la arquitectura, se ha propuesto como una concepción del espacio desde un punto de vista no imaginado en la concepción de este proyecto. Ya que, como primer supuesto arrasado, se han eliminado las "roturas" perimetrales, permitiendo ahora solamente las aperturas cenitales, cambiando de éste modo todo el modo comprender éste proyecto.

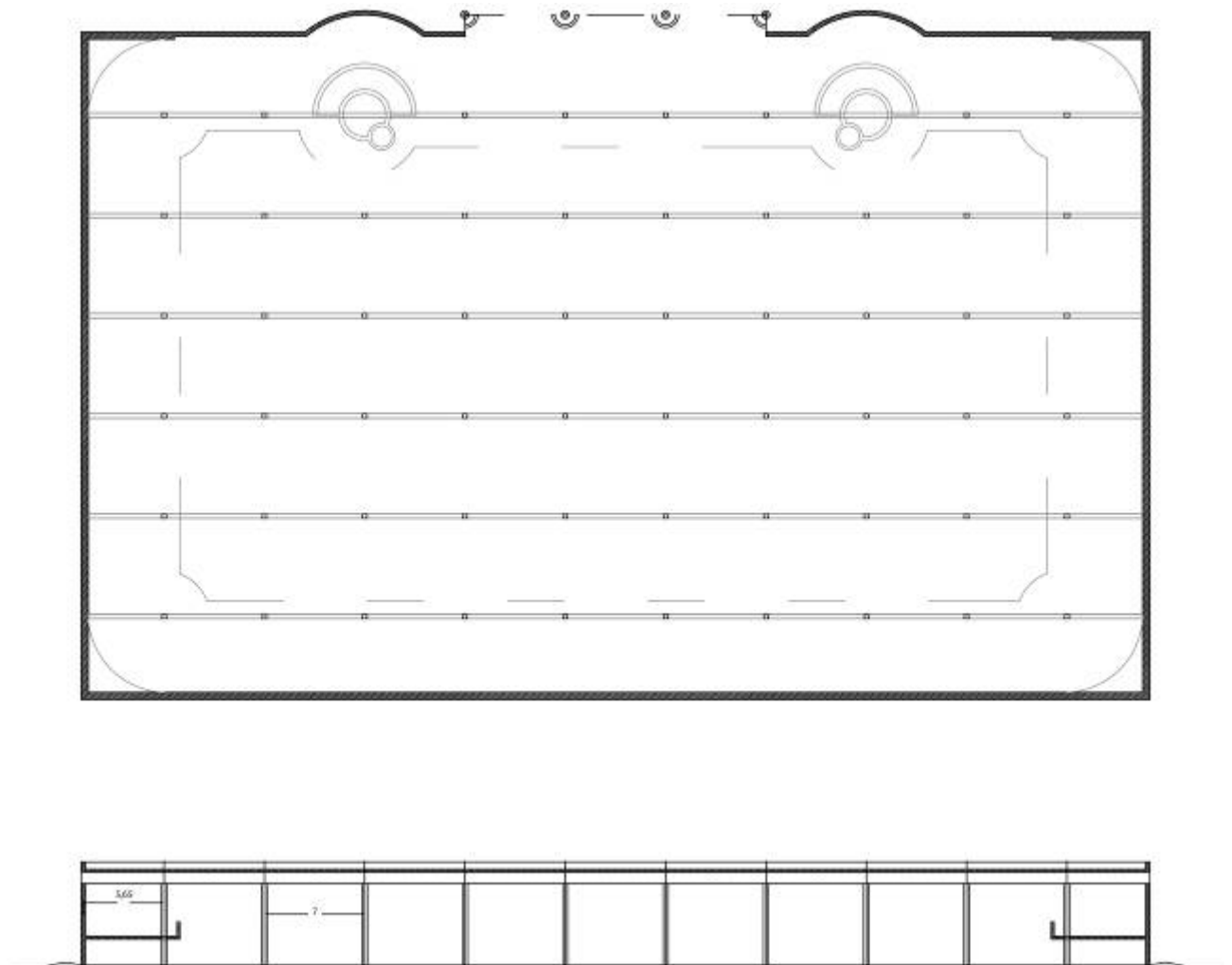


Figura 81. Propuesta con muros de carga y luces originales de 7 metros

Se ha mantenido la distribución de pilares interiores original para poder observar también cómo se concibe la gran sala de trabajo con un mayor número de pilares pero en sección rectangular, ya que en el supuesto anterior con sección rectangular se había disminuido el número de éstos.



Figura 82. Carga distribuida sobre propuesta de muro de carga y apoyos intermedios.

En el esquema de la distribución de cargas superior se puede detectar el cambio más significativo con respecto a los anteriores, que no es otro que la eliminación de los voladizos en los extremos. Aún teniendo en cuenta ese cambio, las variaciones de cálculos van a ser mínimas, por lo que en este supuesto nos centraremos en las diferencias conceptuales y perceptivas, que éstas sí que son importantes en la solución expuesta.

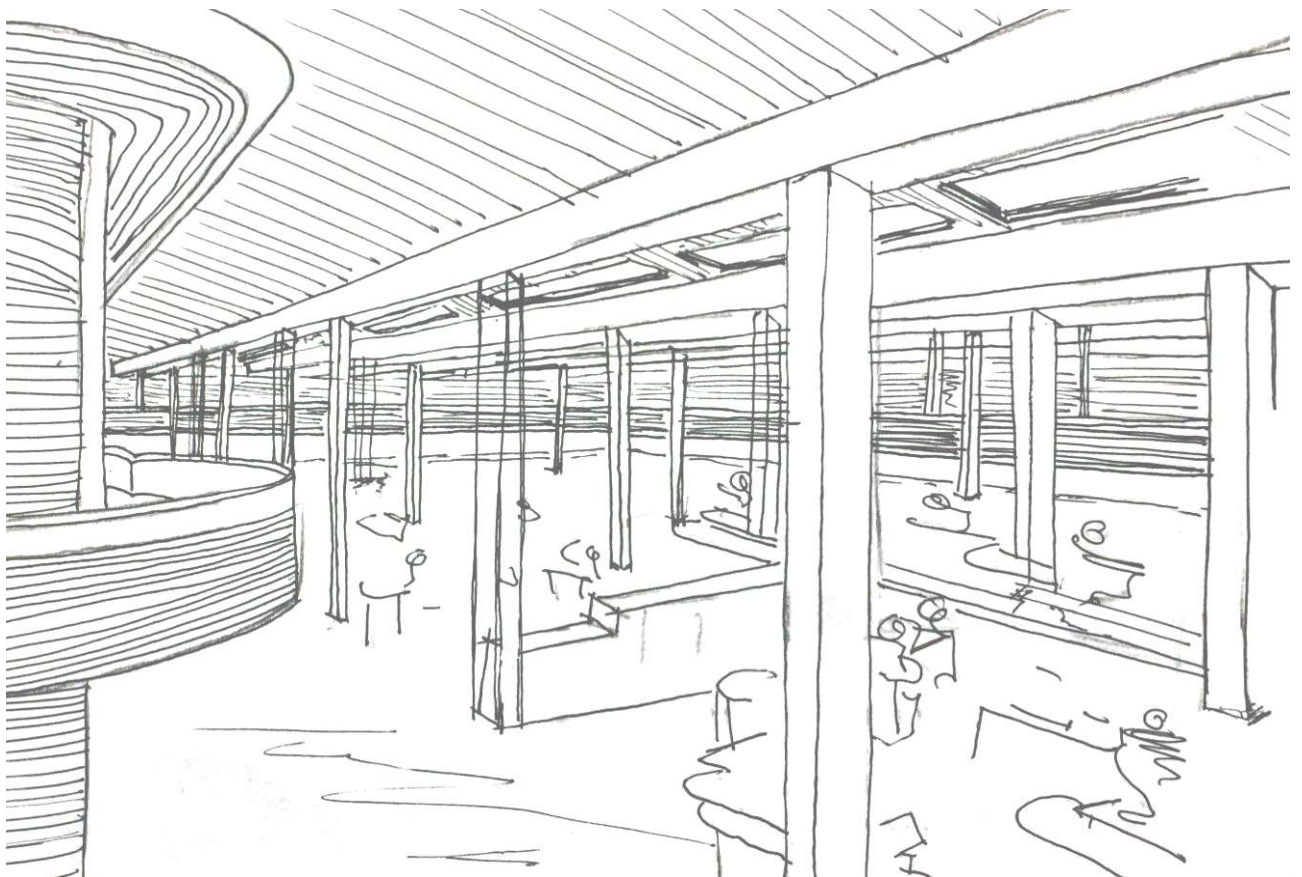


Figura 83. Dibujo esquema percepción sala de trabajo con tipología propuesta.

Tanto compositiva como perceptivamente, la propuesta de muros de carga con elementos verticales puntuales en la parte interior es muy similar a la anterior. En éste caso, como se ha mantenido el número de pilares interiores, el espacio queda un poco más denso, arrojando más el espacio, pero al ser angulares, hacen que el espacio no fluya orgánicamente. El aspecto que mayor influencia compositiva tiene es el hecho de que sean muros de carga perimetrales, por lo que cambia como se ha dicho totalmente el concepto del edificio así como la percepción de la luz.

**(e) Utilización de losa como cubierta y pilares fuera de retícula:**

El último supuesto que vamos a tratar tiene de nuevo cambios importantes ya que se vuelve a crear un campo de pilares circulares o troncocónicos como los originales, pero se van a sacar de una organización en retícula regular. Para analizar una solución como la propuesta, se va a utilizar como modelo el proyecto de Sanaa arquitectos para el Centro de Estudios Rolex.

Este ejemplo se ha tomado ya que utiliza como cubierta una losa continua y la búsqueda de la organicidad en nuestros tiempos. Siendo de este modo la idea arquitectónica más cercana a la de Wright salvando el tiempo que difiere entre ambos.

Otro aspecto por el que se podría relacionar la arquitectura de Wright con la de Sanaa es la tipología de aperturas cenitales utilizadas por los arquitectos contemporáneos, de nuevo, muy semejantes a las que se podrían haber dado en un proyecto del tipo y calidad del tratado si se hubieran tenido los medios técnicos.

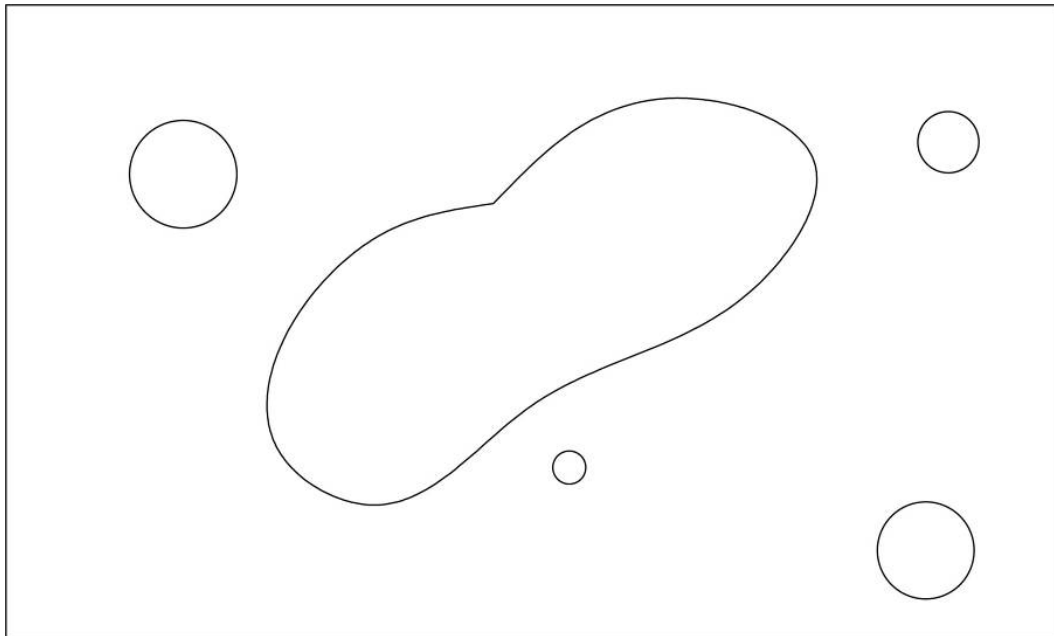
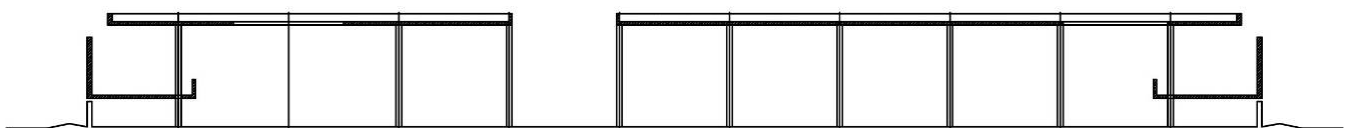


Figura 84. Esquema aperturas orgánicas SANAA.

Adquiriendo estos aspectos de la arquitectura de SANAA, se va a optar por la apertura cenital con formas orgánicas intentando acercarnos a una percepción de la entrada de luz más similares a las utilizadas por Wright. Del mismo modo se utilizará una losa continua como elemento de cubierta y una distribución de pilares más libre, dependiendo de los huecos creados en la parte superior, intentando mantener las "roturas" perimetrales en la envolvente.



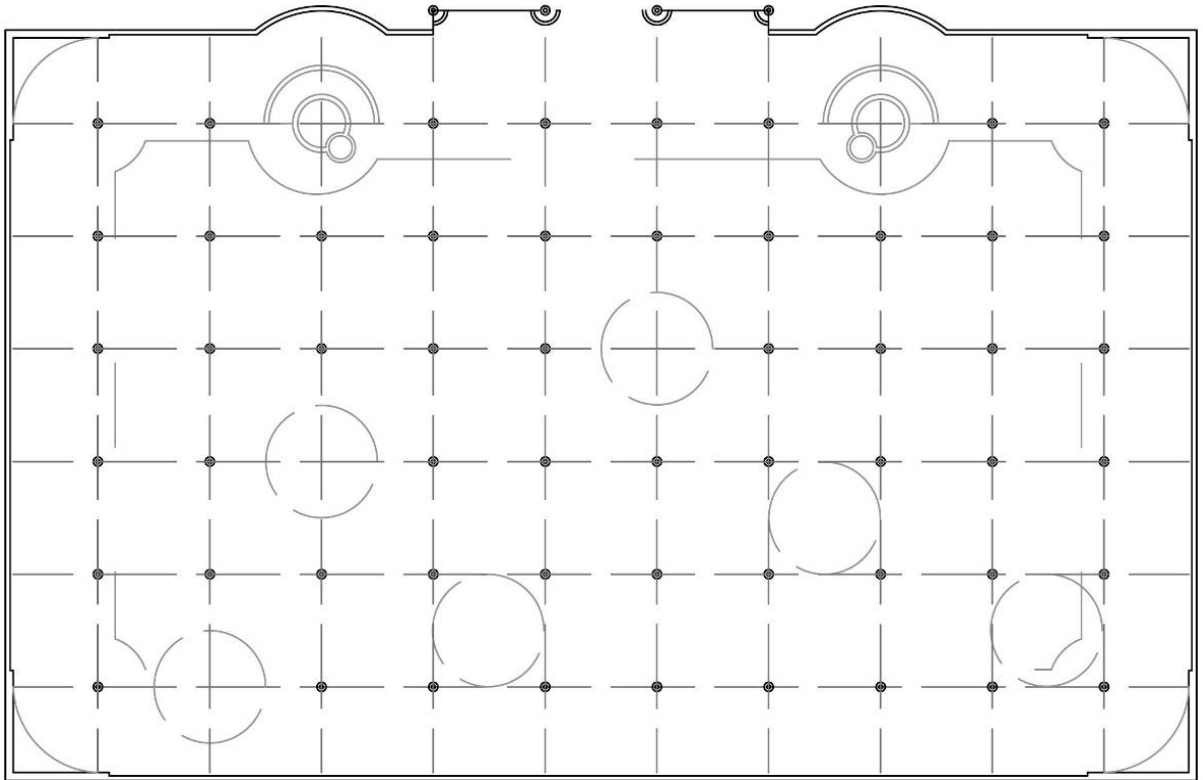


Figura 85. Propuesta con losa como cubierta y aperturas orgánicas.

Como vemos en la sección esquema superior, algunas aperturas podrían crear patios como ocurre en los propios proyectos de SANAA y en cambio otras, podrían ser meros lucernarios cenitales. La distribución de pilares podría variar en múltiples aspectos, que dependerían de la situación de estas aperturas y de las necesidades funcionales de proyecto. Por eso se ha creado un pequeño ejemplo esquemático eliminando simplemente algún punto de apoyo para mostrar cómo podría variar significativamente en planta.

En éste punto, hay que resaltar un factor que en las propuestas anteriores no tenía mayor importancia, y es el propio pilar. Ya que en las realizadas, todas se formaban a partir de una retícula reglada, lo que quiere decir que al ser equidistantes en la recepción de las cargas de la cubierta y del piso superior, los esfuerzos normales actuaban sin crear ningún tipo de momento sobre dichos pilares. Pero en el supuesto a tratar, con la eliminación puntual de pilares, aparecerían en algunos de éstos elementos, normalmente los localizados en los puntos en las cercanías de los vacíos o de las eliminaciones "aleatorias" de elementos verticales. El momento actuaría en la cabeza del pilar, por lo que habría que tratarlos para que aguantaran dichos esfuerzos.

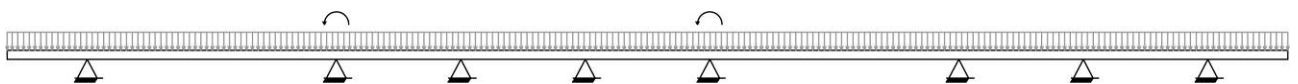


Figura 86. Esquema cargas distribuidas con momentos puntuales actuantes en cabeza de pilar.

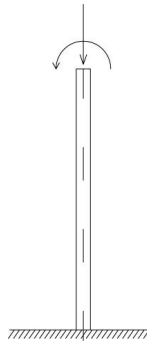


Figura 87. Esquema pilar con momento actuante en cabeza.

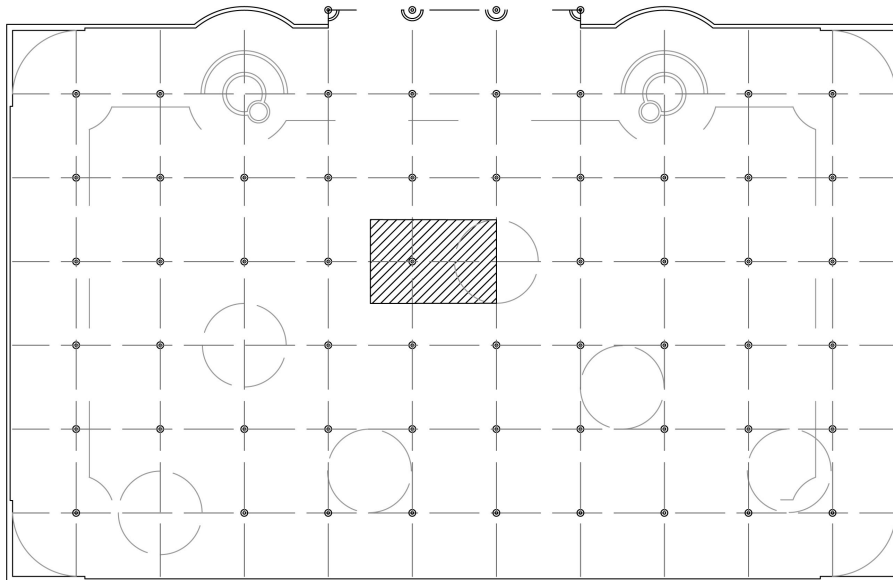
Se va a realizar un cálculo en una de las líneas de pilares supuestas. Aún eliminando pilares, como se ha dicho, para poder realizar un número de manera rápida, se ha mantenido la retícula en una dirección, separadas de igual manera 7 metros, por lo que la carga distribuida actuante sigue teniendo el valor de  $q=46,34 \text{ Kn/m}$

Se escogerá un vano de gran luz  $l=14$  para calcular el momento flector y a partir de él calcular el área de estructura, este momento será existente en el centro del vano con un valor de:

$$\rightarrow M=q l^2/16 \rightarrow M=46,34 \text{ Kn/m} \times 196 \text{ m}^2 / 16 = \underline{567,66 \text{ Kn} \cdot \text{m}} = \underline{5788521,05 \text{ kg cm}}$$

Por otro lado es necesario calcular la carga actuante sobre un pilar:

$\rightarrow$  Carga  $q=6,62 \text{ Kn/m}^2$  y área tributaria correspondiente a pilar elegido de  $10,5 \times 7 = 73,5 \text{ m}^2$  por lo que el axil actuante sobre cada pilar es de  $73,5 \times 6,62 = \underline{486,57 \text{ Kn}} = \underline{48657 \text{ kg}}$

Figura 1. Esquema áreas tributarias de  $10,5 \times 7 \text{ m}$ 

Una vez se tienen los valores calculados en la parte superior, se puede proceder al cálculo de la cantidad de estructura necesaria para vigas y pilares:

$$\text{Pilares hormigón: } A = 48657 \text{ kg} (1,45) / 100 \text{ kg/cm}^2 = \underline{705,53 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Pilares acero: } A = 48657 \text{ kg} (1,45) / 2600 \text{ kg/cm}^2 = \underline{27,14 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Vigas: } W = 5788521,05 \text{ kg} \cdot \text{cm} (1,45) / 100 \text{ kg/cm}^2 = \underline{83933,5 \text{ cm}^3}$$

Esta última propuesta tratada, aunque puede notarse como una de las más intrusivas en cuanto al proyecto original de Wright por esa inclusión de "patios", es conceptualmente y siempre bajo mi punto de vista, la que más se acerca a la idea original. Como se puede percibir en el dibujo esquemático inferior, la intrusión de luz es prácticamente la misma que en la original, incluso consiguiendo un mayor organicismo, ya que pierde la regularidad anterior, ya que las aperturas son de una mayor aleatoriedad. Así mismo, las perforaciones totales que entran en la sala ayudan a crear un espacio de trabajo muy amable y con mucha entrada de luz.

Por esto, éste supuesto sería el de una mayor calidad y posiblemente más admisible en cuanto a una concepción de la estructura del proyecto si este tuviera lugar hoy en día.

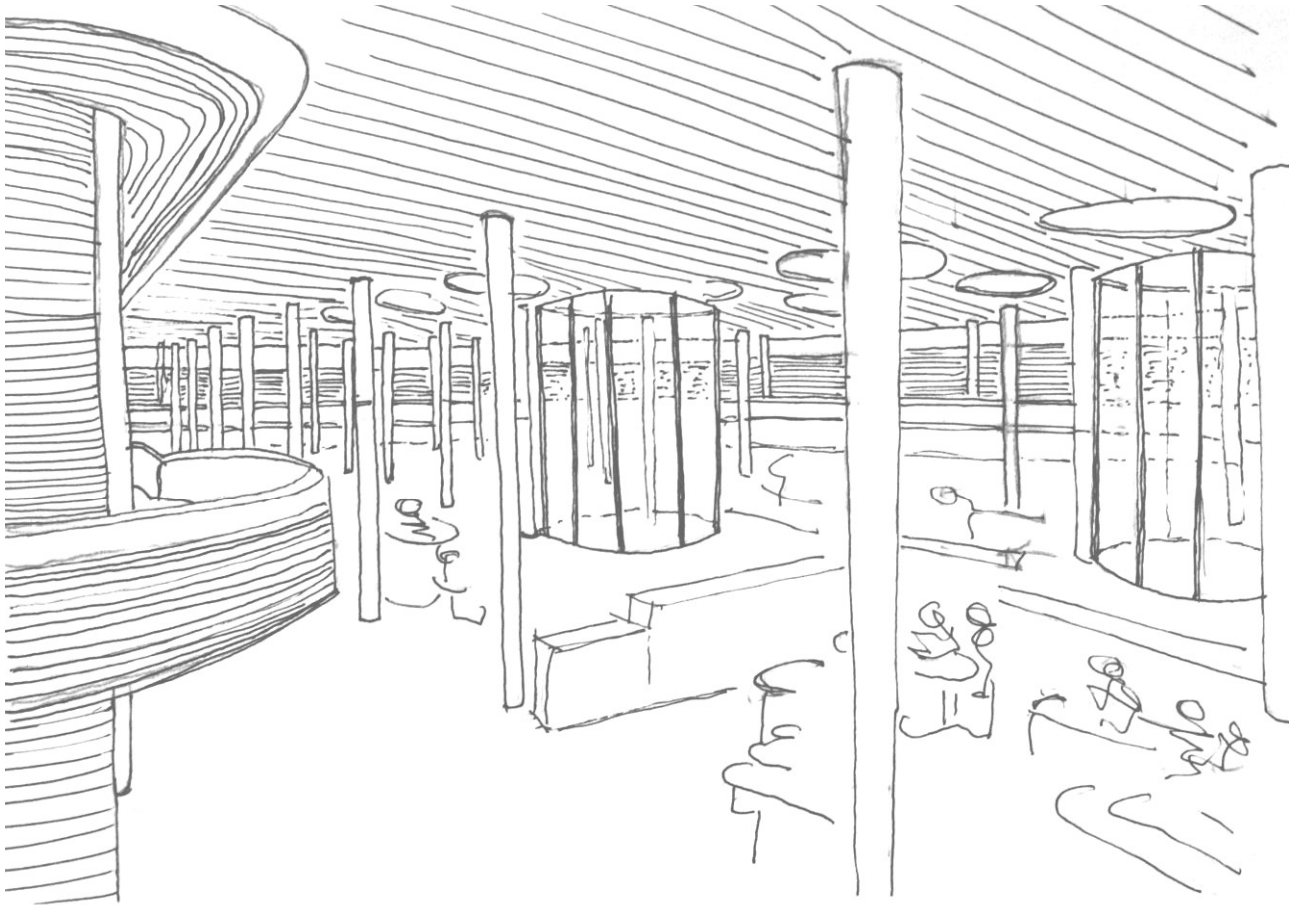


Figura 2. Dibujo esquema percepción sala de trabajo con tipología propuesta



#### **IV. CONCLUSIONES**

##### **CONCLUSIONES:**

El trabajo de investigación realizado ha permitido comprender la importancia de la estructura dentro de un edificio, desde su papel secundario en la antigüedad hasta un papel principal, incluso de motivo de proyecto en ciertas ocasiones en la actualidad. Así mismo, el presente trabajo ha contribuido a alcanzar un mayor conocimiento de la evolución técnica de los edificios, principalmente de la estructura así como de su manera de representarla.

El conocimiento previo que se ha adquirido en el campo de la crítica de las estructuras, ha facilitado el análisis de diferentes tipologías estructurales, comparando soluciones desde el punto de vista compositivo, formal y técnico.

La conclusión final de este trabajo fin de grado y del análisis realizado sobre el edificio de Frank Lloyd Wright después del estudio de los supuestos, es que la tipología estructural utilizada por dicho arquitecto fue pionera en su época, y podría serlo de la misma manera hoy en día. El hecho que más ha influenciado en comparación con las demás es, que no solo aporta avances tecnológicos, sino que la estructura adoptada por Wright es un resumen de sus principios de proyecto, aportando esas ideas que posteriormente discurren por todo el conjunto, en este caso, del edificio Johnson Wax como son el organicismo y la conexión con la naturaleza, ambas repetidas varias veces debido a su importancia a lo largo del desarrollo del trabajo.

El único supuesto de los presentados anteriormente que podría ser convincente de haber sido utilizado en el proyecto sería el descrito a partir de las ideas de SANAA. Debido a que por similitud en cuanto a motivos creadores e idea, no solo formal sino transmitida esta a la estructura permite un diálogo completo entre estructura y arquitectura, al igual que en la solución original.

Desde un punto de vista más técnico, dejando de lado lo conceptual, se ha calculado de manera aproximada la cantidad de estructura necesaria para vigas y pilares en las diferentes soluciones propuestas, factor que se ha utilizado para comparar los supuestos. Se observan así pocas variaciones entre las soluciones, debido sobre todo al poco peso de la cubierta superior. Esto nos conduce a darnos cuenta que, de nuevo, el mayor avance, tecnológico en este caso, vuelve a estar en la estructura de Frank Lloyd Wright, que al ser hueca permite el transcurso de las canalizaciones, problema que habría que abordar en cualquiera de las demás tipologías propuestas y que podría afectar al aspecto exterior de la obra maestra creada por Frank Lloyd Wright.





## V. BIBLIOGRAFÍA

### 1. BIBLIOGRAFÍA:

JACQUES HEYMAN, Análisis de estructuras. Un estudio histórico. (Original 1998)

JUAN REY REY, La barrera del análisis estructural y la representación gráfica en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos: El caso de la ópera de Sidney. (2013)

JONATHAN LIPMAN, Frank Lloyd Wright and the Johnson Wax Buildings.

ANTHONY ALOFSIN, Frank Lloyd Wright the lost years, 1910-1922, a study of influence.

PETER EISSENMAN, 10 Edificios Canónicos.

KENNETH FRAMPTON, A Genealogy of modern Architecture, Comparative Critical Analysis of Built Form.

CERVERA, Concebir y analizar estructuras, 2011.

BERNABEU, Estrategias de diseño estructural en la arquitectura, 2007.

CERVERA, Cálculo Estructura y Resistencia Materiales Desarrollo Histórico, 1982.

JOSÉ JARAÍZ, SANAA, Espacios, límites y jerarquías.

FERNANDEZ CABO, 1998 Estructura Tamaño Forma y Proporción

ROSA ANAGUERRA, Tesis 2012 , Bóvedas y Contrarresto del Colegio de Nuestra Señora de la Antigua de Monforte de Lemos.

AUGUST KOMENDANT, 1980. 18 años con el arquitecto Louis I. Kahn. Colegio oficial de Arquitectos de Galicia.

RICARDO AROCA, 2000. Vigas 1 Resistencia. Madrid. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la ETSAM.

RICARDO AROCA, 2000. ¿Qué es estructura?. Madrid. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la ETSAM.

RICARDO AROCA, 2000. Vigas trianguladas y cerchas. Madrid. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la ETSAM.



**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA



ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS DE LOS GRANDES ARQUITECTOS

**EDIFICIO JOHNSON WAX**  
**FRANK LLOYD WRIGHT**

Autor: RUBÉN ARRANZ MORENO  
Tutor: GAMALIEL LÓPEZ RODRIGUEZ